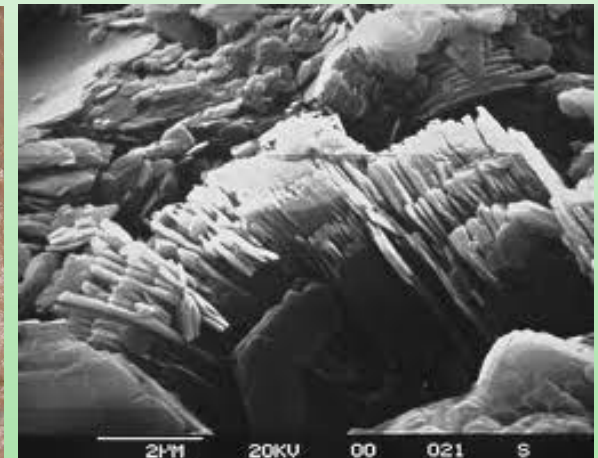


PRIMIJENJENA MEHANIKA TLA

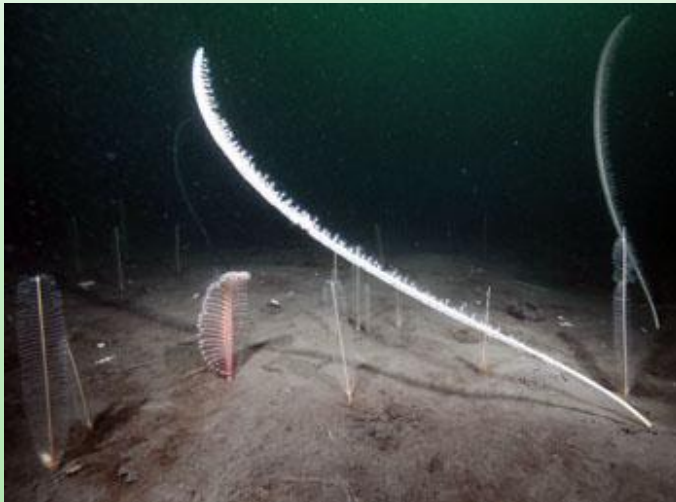
(IV . predavanje)

SADRŽAJ

- gline (porijeklo, sastav, fiz. karakteristike)
- ponašanje glina u edometarskom pokusu
- ponašanje glina u troosnom pokusu
- čvrstoća glina



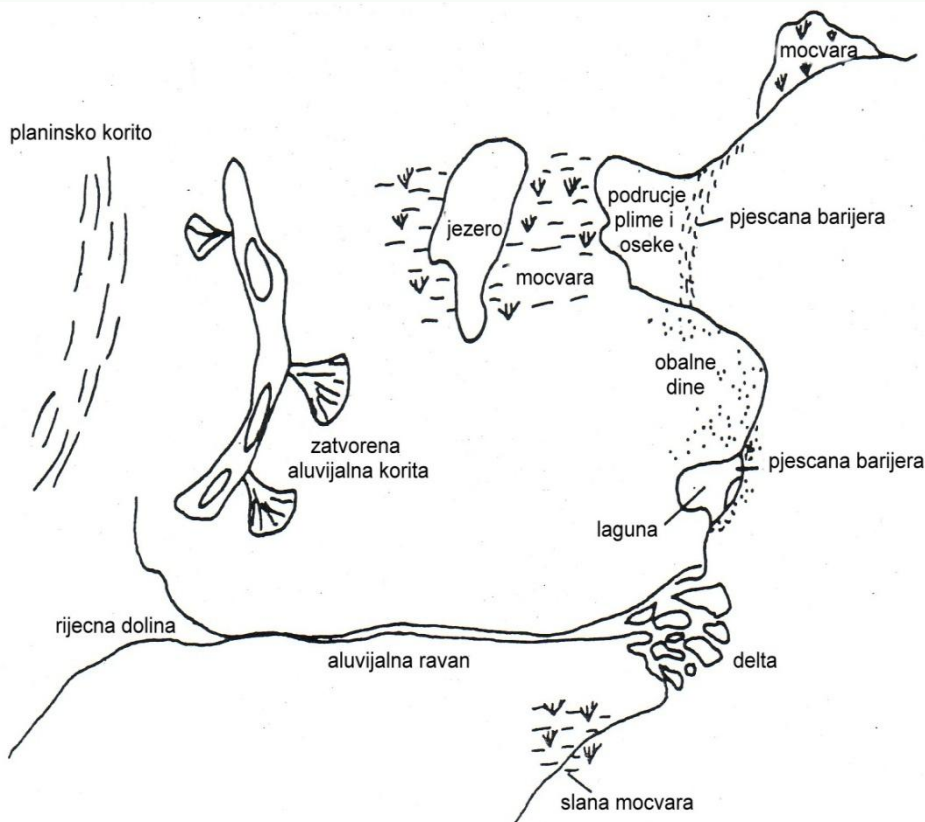
NASTANAK GLINA



Primjeri lokacija na kojima nastaju naslage glina.
a) riječna dolina; b) estuarij; c) morsko dno; d) lagune

NASTANAK GLINA

UVJETI OKOLIŠA TALOŽENJA GLINA



FAKTORI KOJI UTJEČU NA KARAKTERISTIKE GLINA

Sastav	Struktura čestica	Povijest naprezanja	Kemijska povijest
granulometrija	orijentacija	rasterećenje	trošenje atmosferilijima
minerologija	uslojenost	isušenje	ispiranje
sadržaj organske tvari	raspucalost	starenje	promjena baze minerala
kemijski sastav porne vode	površina smicanja		vezivanje / cementacija
	Kanali korijenja		tiksotropija
	pukotine od sušenja		
uvjeti okoliša taloženja			
proces nakon taloženja			

a) Vrste okoliša taloženja mekih glina (prema Christoulasu 1987); b) Faktori koji utječu na mehaničke karakteristike mekih glina (prema Hightu 1987)

PROCESI U TLU NAKON TALOŽENJA

Promjena		Proces nakon taloženja	Posljedice na tlo
naprezanje	struktura čestica	erozija	prekonsolidacija rasterećenjem, propadanje i smicanje
		zbijanje valovima	prekonsolidacija
		isušivanje	prekonsolidacija, formiranje kore, pucanje uslijed skupljanja
		zamrzavanje-odmrzavanje	prekonsolidacija, segregacija
kemijski sastav		bioturbacija	iskapanje rupa i popunjavanje, formiranje kanala od korijenja, promjena propusnosti i kemijskog sastava
		propadanje i smicanje	razvoj pukotina, zona smicanja i ploha niske čvrstoće,
		trošenje	oksidacija i promjena sastava tla što uzrokuju promjenu plastičnosti, čvrstoće pregnječenog uzorka i osjetljivost

Promjena	Proces nakon taloženja	Posljedice na tlo
kemijski sastav	ispiranje	promjena kemijskog sastava porne vode i izmjena iona koji uzrokuju promjenu plastičnosti, čvrstoće pregnječenog uzorka i osjetljivost
		povećanje čvrstoće, redukcija inicijalne stišljivosti zbog karbonatnih veza i oksidacija
	tiksotropija	povećanje čvrstoće pri konstantnoj vlažnosti, prekonsolidacija
	starenje	smanjenje vlažnosti, povećanje čvrstoće pri konstantnom vertikalnom efektivnom naprezanju, prekonsolidacija

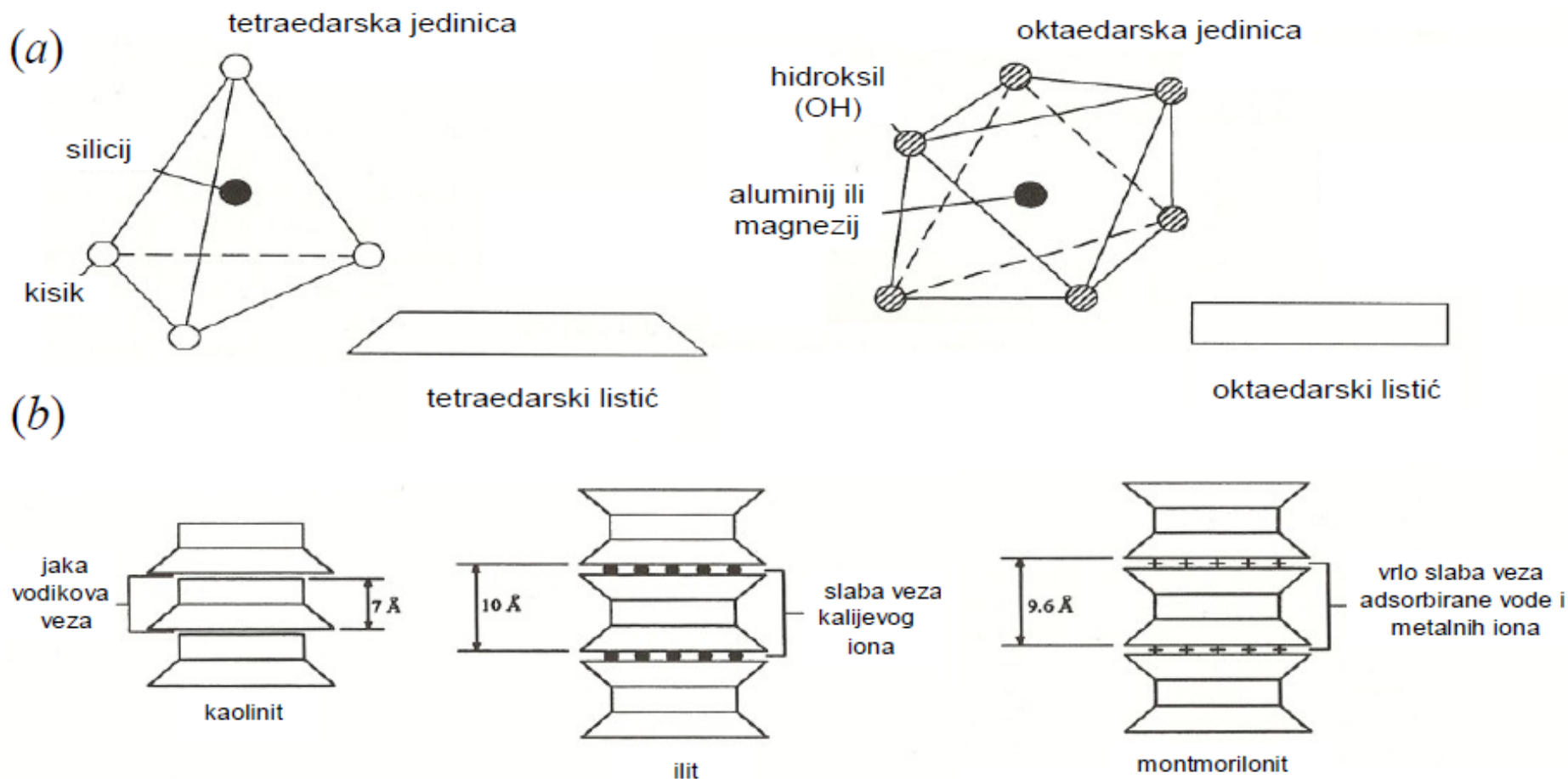
Vrste procesa nakon taloženja i njihov utjecaj na karakteristike tla (prema Hight 1987)

NASTANAK GLINA

Taloženje većine današnjih mekih glina odvijalo se u relativno mladoj geološkoj prošlosti, u razdoblju kvartara koje traje od prije 1.6 milijuna godina. Vrlo meke gline nastale su uglavnom u razdoblju od zadnjeg ledenog doba koje je završilo prije oko 10 000 godina (razdoblje holocena). Debljine naslaga sedimenata nastalih u tom razdoblju kreću se od 10 do 2600 m, a brzine taloženja od 0,03 do 120 m/1000 godina. Neke od današnjih naslaga mekih glina završile su proces taloženja, međutim u većini slučajeva proces se još uvijek odvija. Uvjeti okoliša u kojem nastaju meke gline mogu biti vrlo promjenjivi, a dijelimo ih na kontinentalne, mješovite i marinske. Vrlo velik utjecaj na nastanak naslaga mekih glina imala je i promjena razine mora u vrijeme izmjene ledenog doba. Samo u razdoblju od zadnjeg ledenog doba procjenjuje se da je razina površine mora narasla za otprilike 100 m.

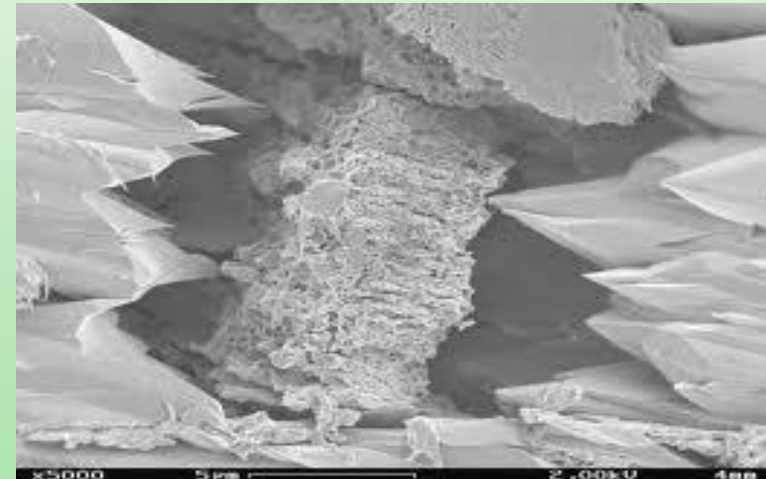
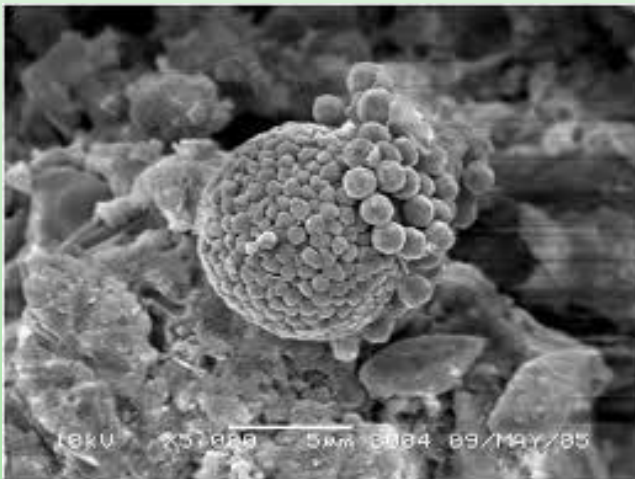
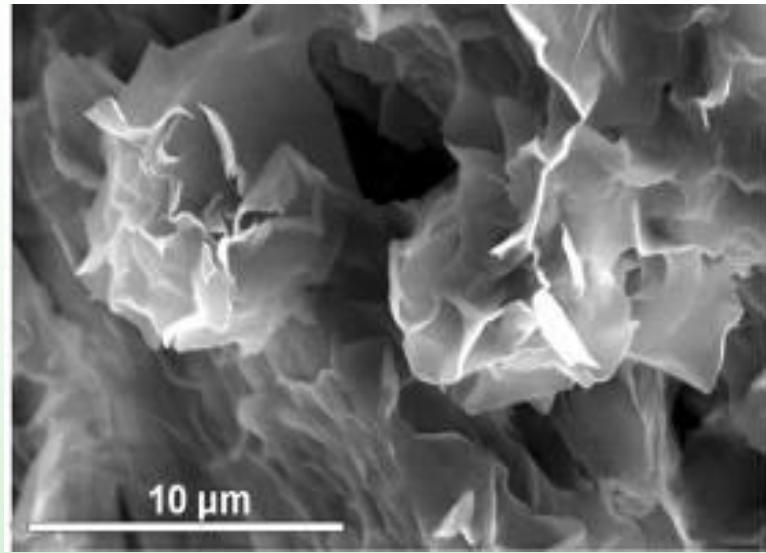
U vrijeme i nakon taloženja, meke gline mogu doživjeti čitav niz procesa koji mijenjaju njihove karakteristike. Najizraženija posljedica procesa koji se odvijaju na naslagama mekih glina je prekonsolidacija koja može biti uzrokovana raznim procesima kao što su isušivanje (koje formira površinsku koru), cementacija (kod koje dolazi do spajanja kalcijevog karbonata, silikata, aluminija i željeznih oksida na kontaktu čestica) te starenje (kod kojeg uslijed puzanja dolazi do smanjenja volumena materijala pri konstantnom vertikalnom efektivnom naprezanju te povećanja gustoće, krutosti i čvrstoće). Do izrazitog smanjenja čvrstoće meke gline te povećanja njene osjetljivosti može doći u slučaju njenog ispiranja kad se slana voda, u kojoj je taložena, zamijeni slatkom vodom (norveške 'brze gline' – quick clay)

MINEROLOŠKI SASTAV GLINA



a) Tetraedarska (silicij) i oktaedarska (aluminij ili magnezij) jedinica minerala glina; b) listićava struktura minerala glina (kaolinit, ilit, montmorilonit)

MINEROLOŠKI SASTAV GLINA



Uvećani prikaz minerala glina

MINEROLOŠKI SASTAV GLINA

Mineraloški sastav čestica tla određen je mineraloškim sastavom stijene porijekla kao i stupnjem promjene ili trošenja. Čestice se mogu podijeliti na tvrda zrna (tvrdi minerali stijena, posebno silikati, veličine praha do valutica), meka zrna (koralji, školjke, razdrobljene meke stijene, rudarski otpad, jalovina, veličine praha do valutica), minerali glina i biljni ostaci (treset, vegetacija, organske materije).

Čestice glina pretežno su sastavljene od minerala glina koji spadaju u grupu filosilikata. Malih su dimenzija, a njihove osnovne ćelije obično imaju negativni naboj koji privlači katione iz vodenih otopina. Struktura običnih lističavih silikata sastavljena je iz kombinacija dviju jednostavnih strukturnih jedinica, ranije opisanog silikatnog tetraedra te aluminijskog ili magnezijskog oktaedra.

Aluminijski ili magnezijski oktaedar je strukturna jedinica koja se može predstaviti pravilnim oktaedrom (tijelo s osam jednakostraničnih trokuta kao stranama). Na svakom od vrhova oktaedra nalazi se hidroksilna skupina (OH), dok mu se u središtu nalazi aluminij, magnezij ili rjeđe neki drugi metalni atom. Kationi u središtu tetraedara i oktaedara obično su visoko nabijeni te uzrokuju snažne odbojne sile između susjednih tetraedara i oktaedara. Kao rezultat, strukture sastavljene iz tetraedara ili oktaedara spajaju se samo na vrhovima ili bridovima, ali nikad stranama jer bi to dovelo katione previše blizu.

MINEROLOŠKI SASTAV GLINA

U većini mineralnih struktura silikatni tetraedri povezani su u listićavu strukturu. Tri od četiri kisikova atoma silikatni tetraedri dijele međusobno tvoreći heksagonalnu mrežu. Pri tome su sve baze tetraedara u istoj ravnini, dok svi preostali vrhovi gledaju u istom smjeru. Tetraedarska se listićava struktura širi teoretski u nedogled, a debljina joj je oko 0,46 nm (4). Oktaedarski listići sastavljeni su na sličan način iz magnezijevih ili aluminijskih oktaedara. Debljina tih listića je oko 0,51 nm.

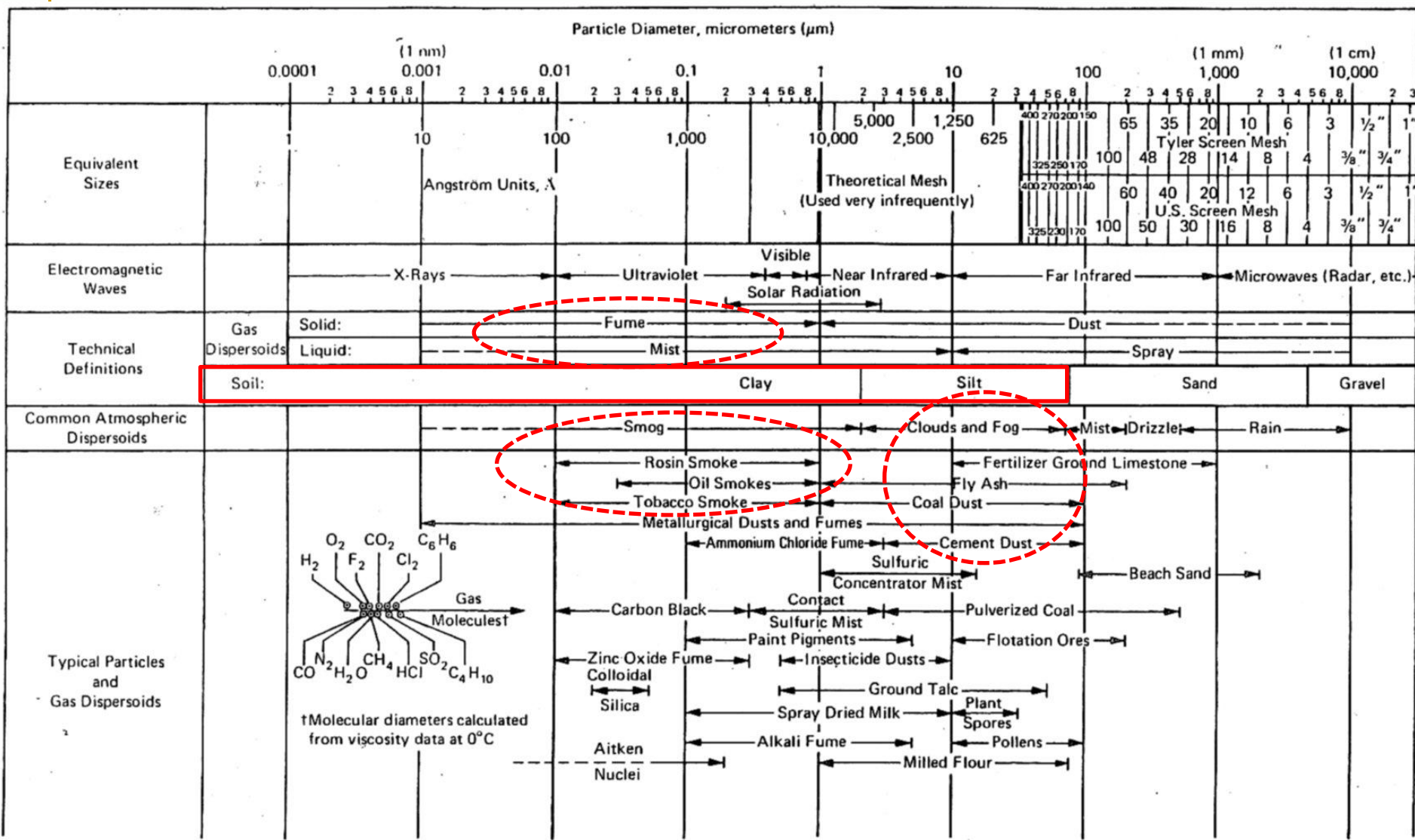
Tetraedarski i oktaedarski listići slažu se u nekoliko osnovnih listićavih jedinica koje se pak dalje slažu u razne minerale glina. Dvolistična jedinica složena je iz jednog tetraedarskog i jednog oktaedarskog listića. Trolističnu jedinicu tvori oktaedarski listić u sredini s dva tetraedarska listića sa svake strane. Listićne jedinice mogu biti dalje usko sljubljene ili se među njima može naći sloj molekula vode, vode s kationima ili hidroksidni sloj, tvoreći osnovne skupine minerala glina. Najpoznatiji su kaolinit (usko sljubljene dvolistične jedinice), halojsit (dvolistične jedinice vezane slojevima vodenih molekula), ilit (trolistične strukture povezane nehidratiziranim kalijem), montmorilonit (trolističave strukture povezane hidratiziranim izmjenjivim kationima), i klorit (trolistične jedinice povezane hidroksidnim slojem).

MINEROLOŠKI SASTAV GLINA

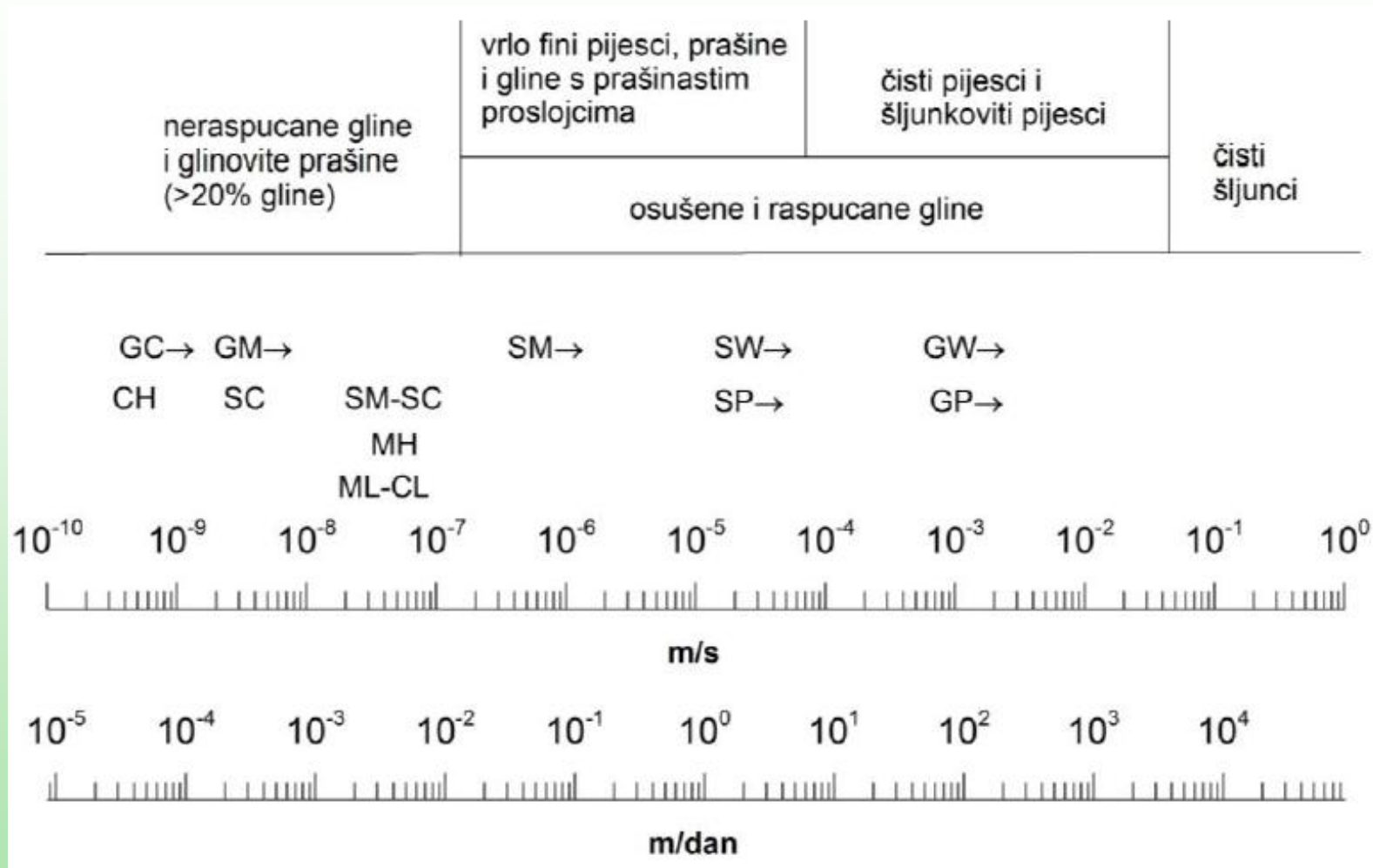
Važan faktor u strukturi i svojstvima minerala glina čini izomorfna zamjena. To je pojava zamjene silicija, aluminija ili magnezija u tetraedarskom ili oktaedarskom listiću nekim drugim kationom bez promjene kristalne strukture. Primjerice, silicij može biti zamijenjen aluminijem, aluminij magnezijem, željezo magnezijem i slično. Zbog izomorfne zamjene većina je minerala glina negativno nabijena (kaolinit nije) što privlači katione između listića. Mnogi od tih kationa su izmjenjivi kationi jer mogu biti zamijenjeni drugom vrstom kationa. Količina izmjenjivih kationa naziva se kapacitetom kationske izmjenjivosti. Izmjena kationa može biti značajna zbog promjene ponašanja minerala glina pri promjenama u okolini. Ta se izmjena može dogoditi kao posljedica utjecaja okoline pri taloženju, trošenjem nakon taloženja, ispiranjem pri dugotrajnom protjecanju podzemne vode te nakon kemijske stabilizacije u inženjerske svrhe (na primjer dodavanjem vapna radi povećanja čvrstoće pri izgradnji cesta). Listićavost minerala glina ima za posljedicu da po jedinici mase imaju vrlo veliku površinu. To svojstvo bitno utječe na njihovo ponašanje u tlu, jer sile na površini čestica dominiraju nad gravitacijskim silama.

Karakter veze među listićima bitno utječe na ponašanje minerala glina. Kad su te veze slabe, među njih se uvlače molekule vode i minerali povećavaju svoj volumen, oni bujaju. Najveći potencijal bujanja ima montmorilonit dok kaolinit ne buja. Dok vrlo bujajući glinoviti materijali mogu izazivat velike probleme u geotehnici, jedan takav materijal, bentonit, ima i znatnu praktičnu primjenu. Bentonit je nastao pretvorbom vulkanskog pepela. Granica tečenja mu je preko 500%.

VELIČINA ČESTICA TLA



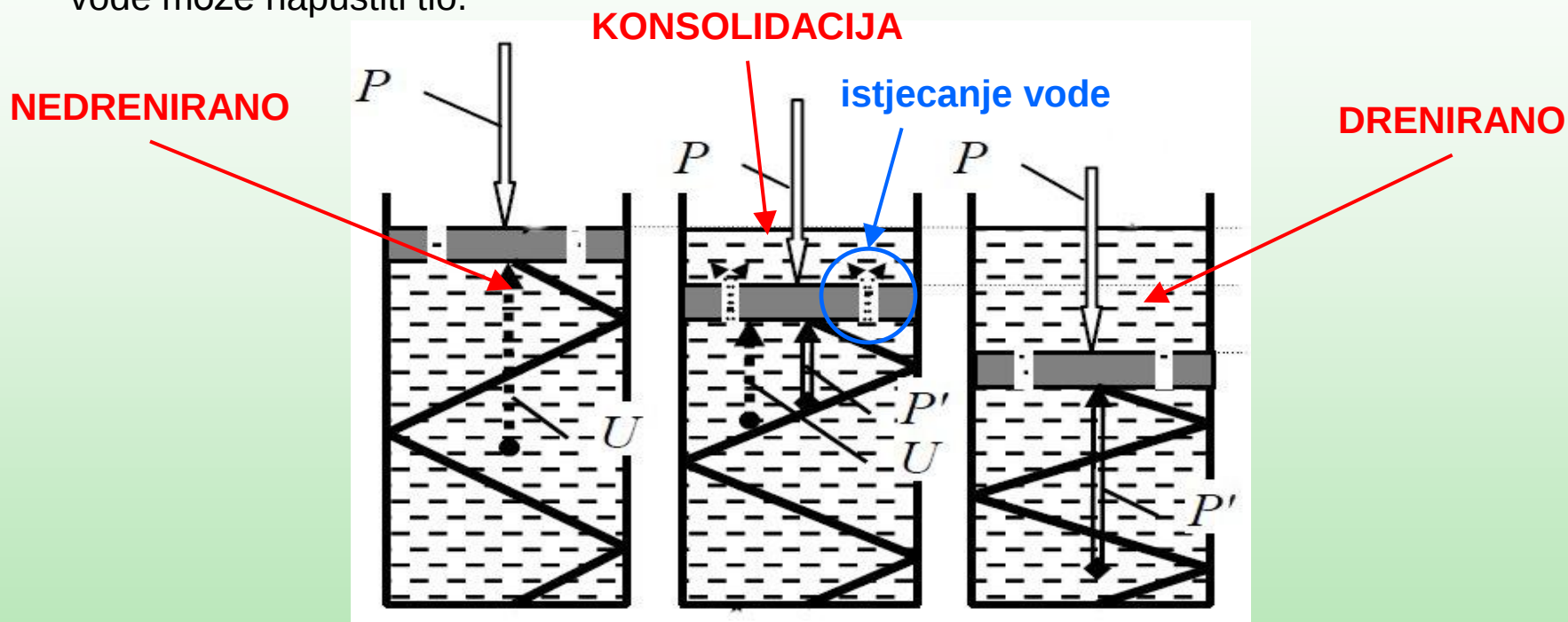
VODOPROPUSNOST TLA



Okvirne veličine koeficijenta vodopropusnosti k
(prerađeno prema Craig, 1997, Mayne i dr., 2001, Cedergren, 1989)

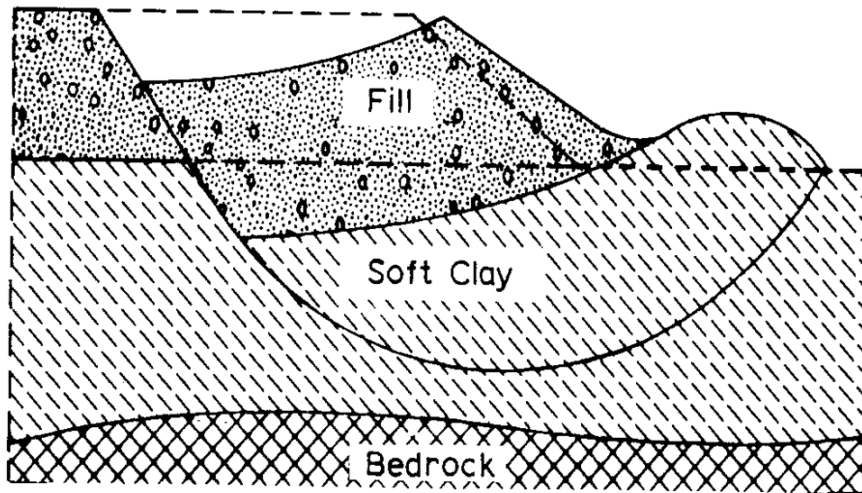
DRENIRANO I NEDRENIRANO STANJE

NEDRENIRANO STANJE TLA javlja se u slučajevima kada je opterećenje na tlo nanoseno tako brzo da u vremenu nanošenja opterećenja samo zanemariv volumen vode može napustiti tlo.



KONCEPT DRENIRANOG / NEDRENIRANOG STANJA: interakcija skeleta čvrstih čestica (opruga) i vode u vodom zasićenom tlu: nedrenirani uvjeti, konsolidacija, drenirani uvjeti (P – vanjsko opterećenje, ukupna naprezanja; P' – efektivna naprezanja koja prenosi skelet tla; U – tlak vode u porama)

NEDRENIRANO STANJE - primjeri



KLASIFIKACIJA TLA – glina / prah



ATTEBERGOVE GRANICE PLASTIČNOSTI :

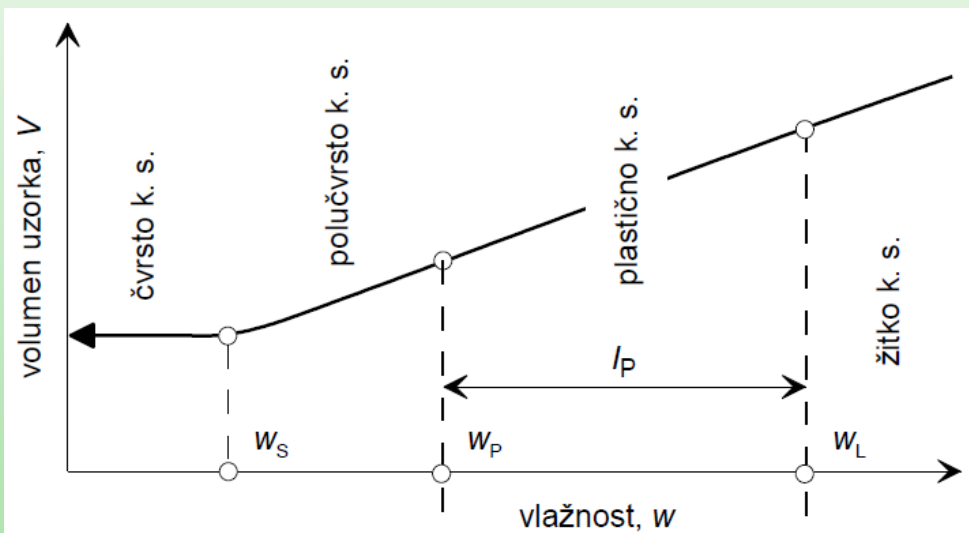
granica tečenja w_L

granica plastičnosti w_P

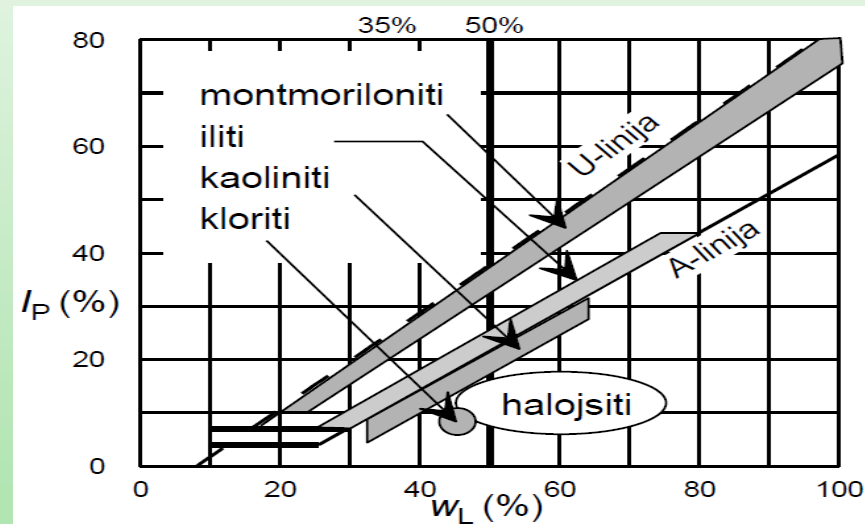
Indeks plastičnosti $I_p = w_L - w_P$

prirodna vlažnost w

Indeks konzistencije $I_c = (w_L - w)/I_p$

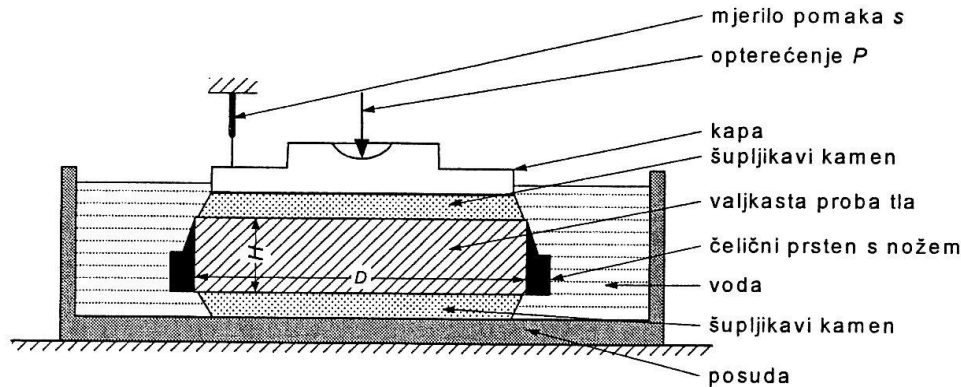


Attebergove granice tečenja i volumen gline



A – dijagram: klasifikacija glina / prah

KOMPRESIJA GLINE – edometarski pokus



ZADAJE SE:

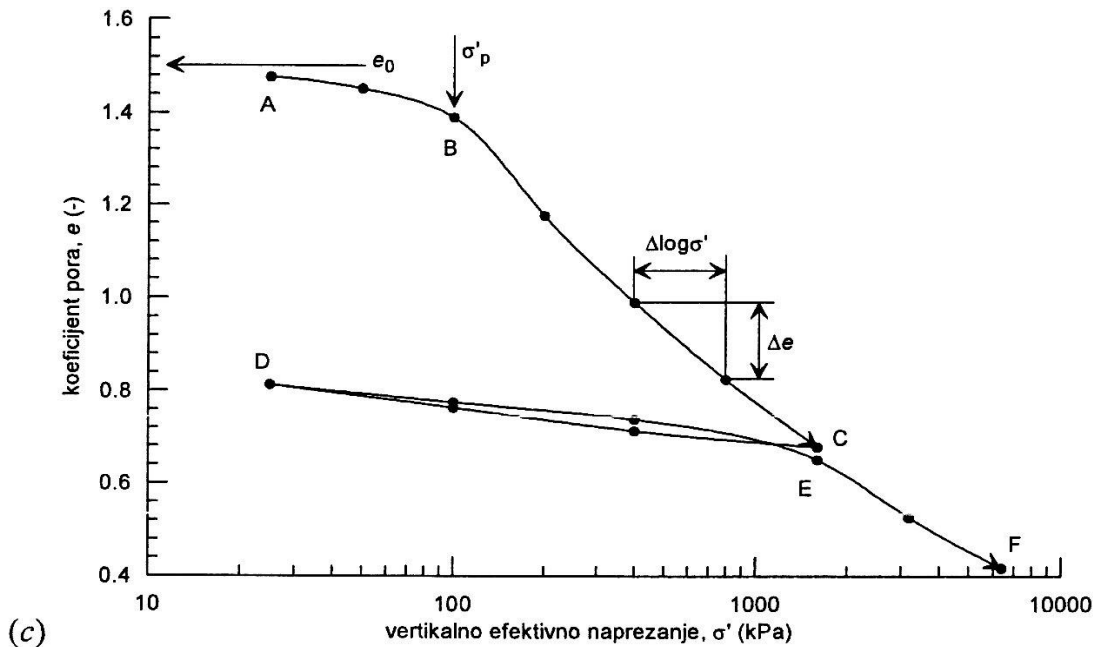
- opterećenje P
(vertikalno naprezanje)
 $\sigma_1 = P/A$

MJERI SE:

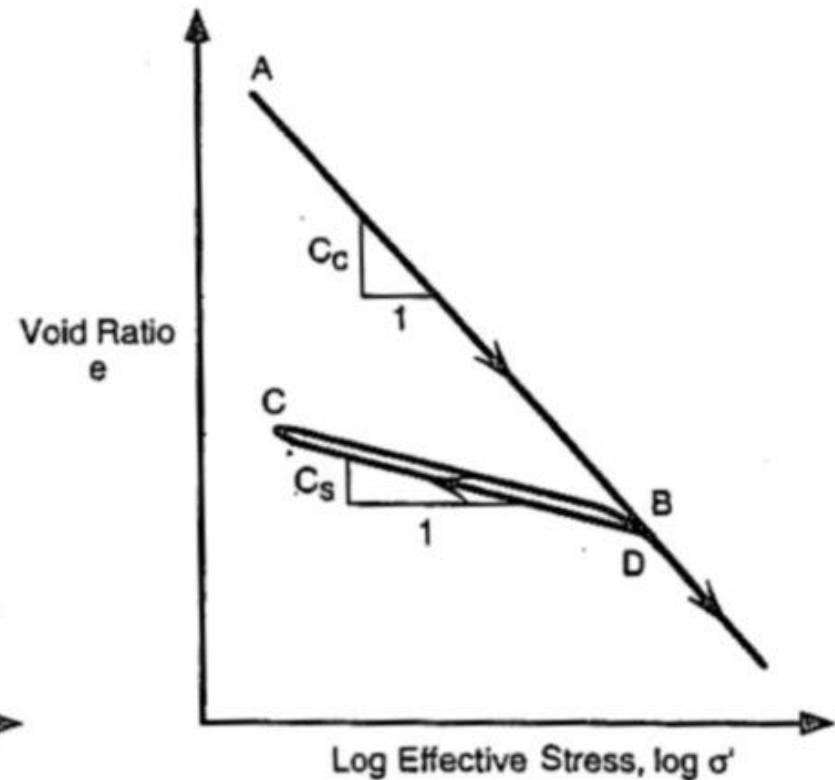
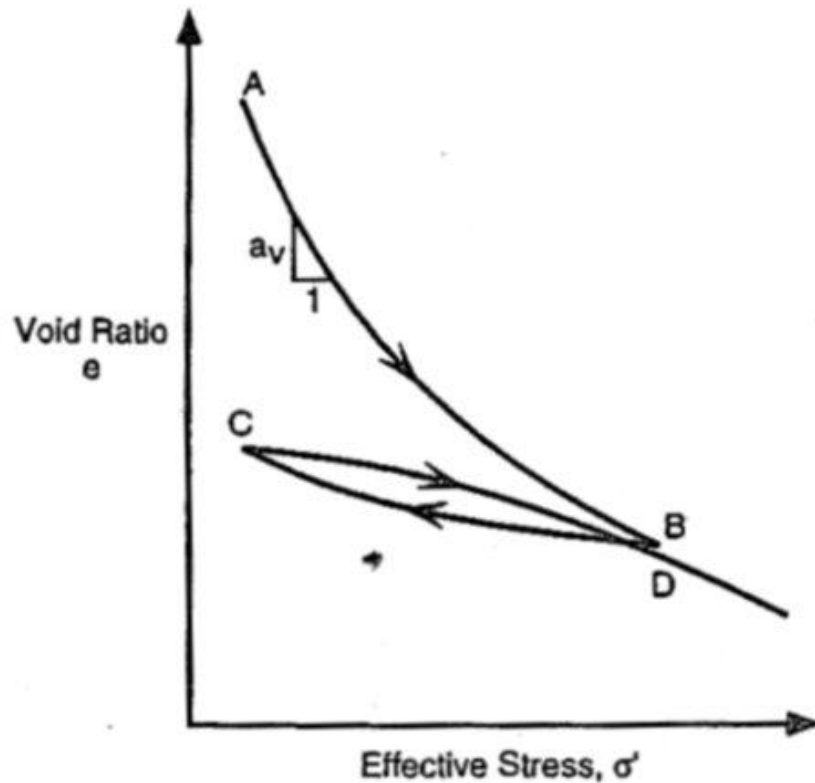
- vertikalna deformacija s_1
(koeficijent pora)
 $e = (H_{V0} - s_1) / H_s$

REZULTAT:

- relativna deformacija
 $\epsilon_1 = s_f / H_0$
- modul stižljivosti
 $E_{\text{oed}} = \Delta \sigma_1 / \Delta \epsilon_1$



KOMPRESIJA GLINE



A-B: opterećenje (primarna konsolidacija)

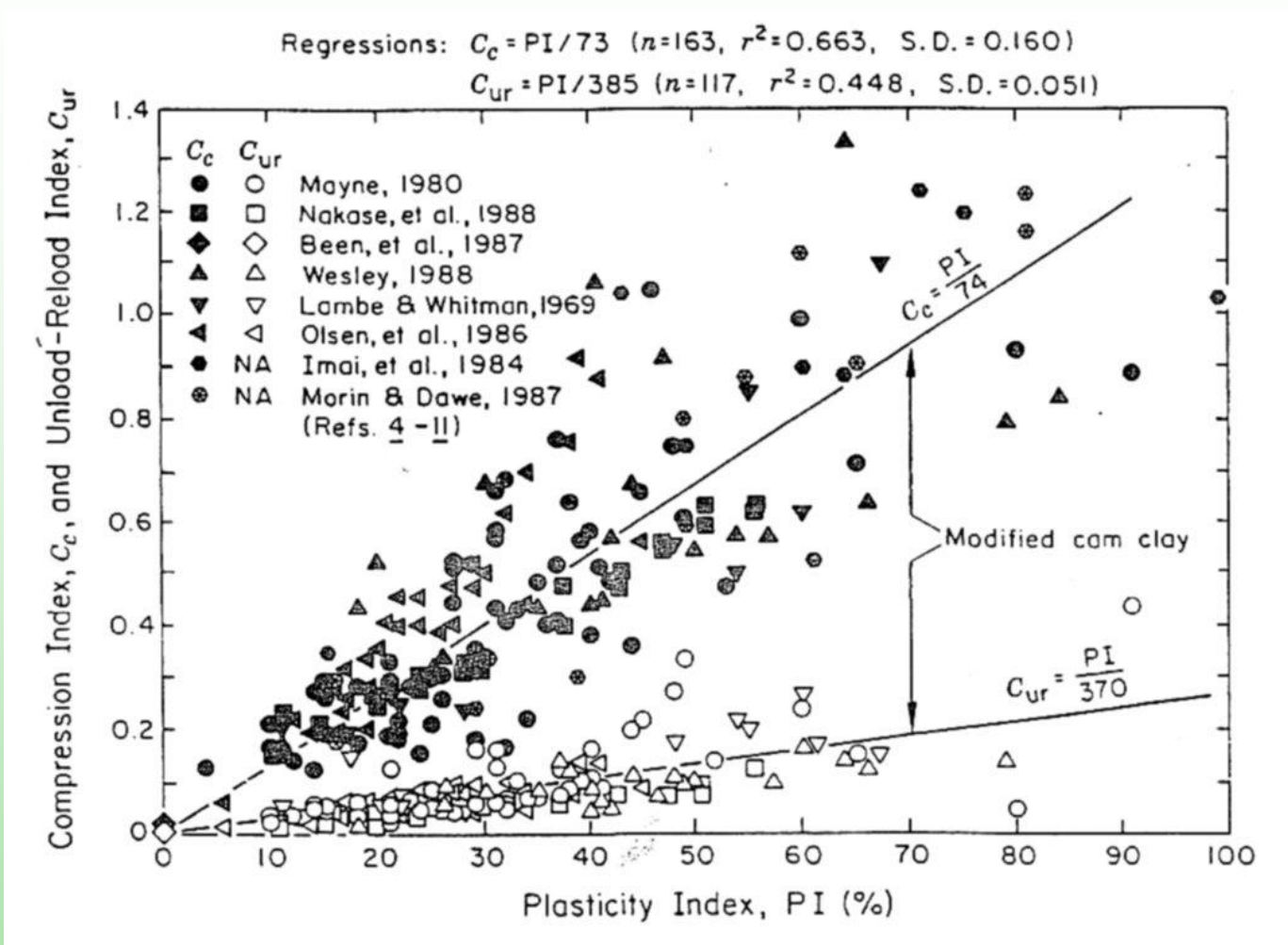
B-C: rasterećenje

C-D: ponovno opterećenje (rekompresija)

- koeficijent kompresije $C_c = -de / d\log(\sigma')$ na pravcu primarne konsolidacije

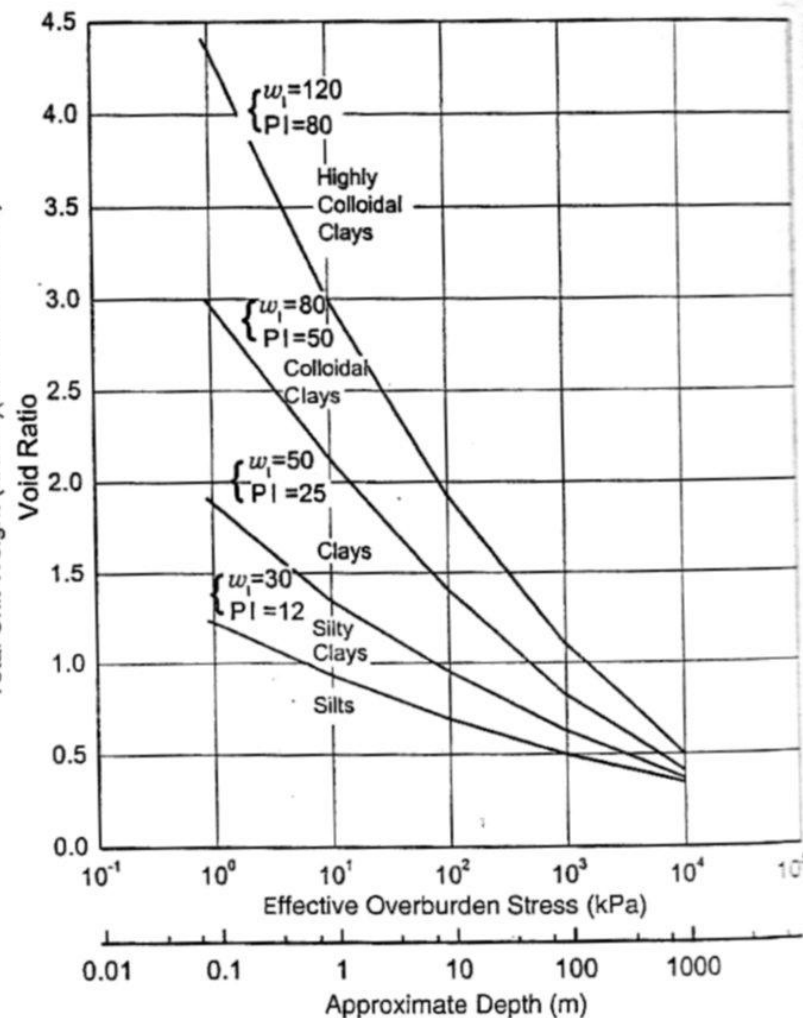
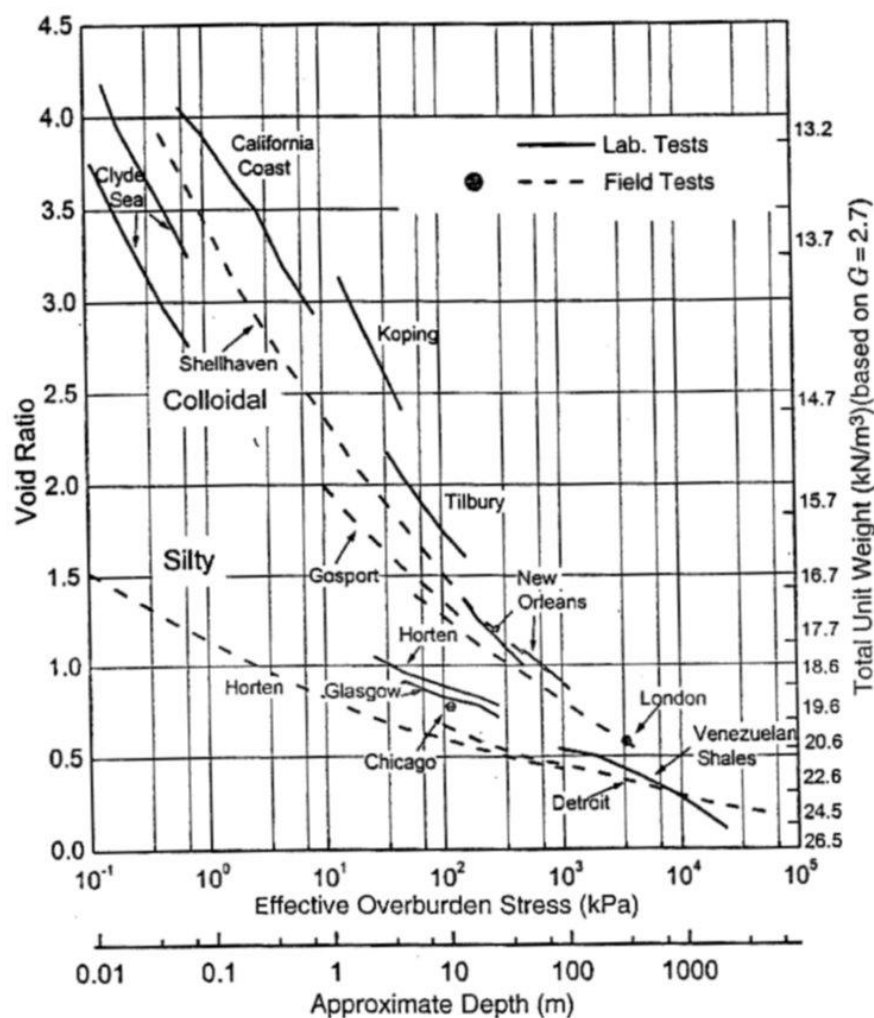
- koeficijent rekompresije $C_s = -de / d\log(\sigma')$ na pravcu rekompresije

KOEFICIJENT KOMPRESIJE I REKOMPRESIJE



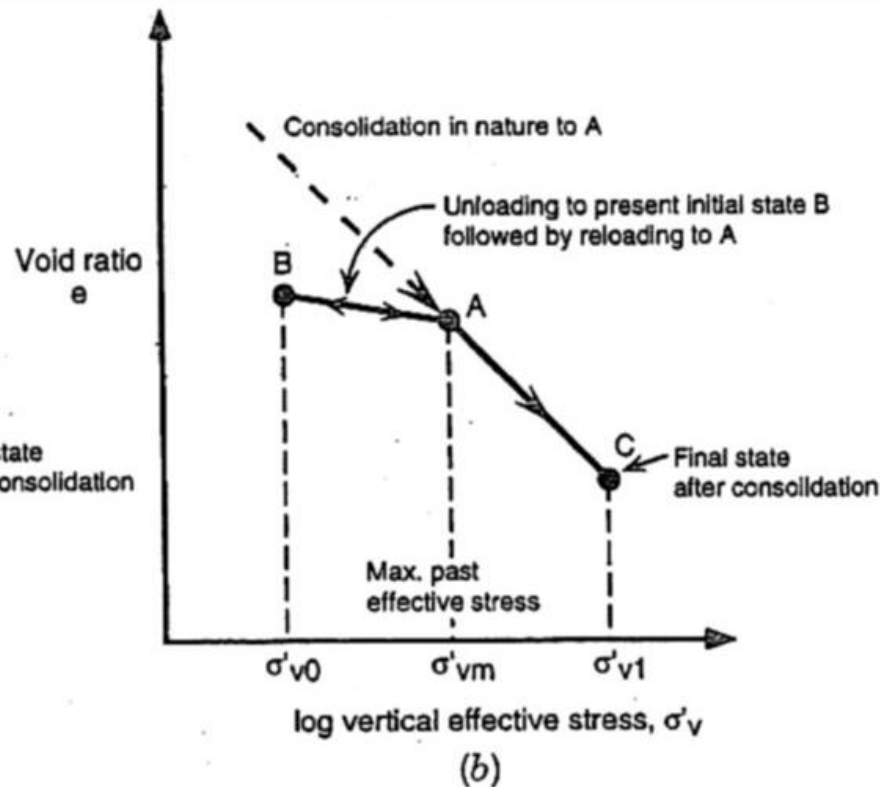
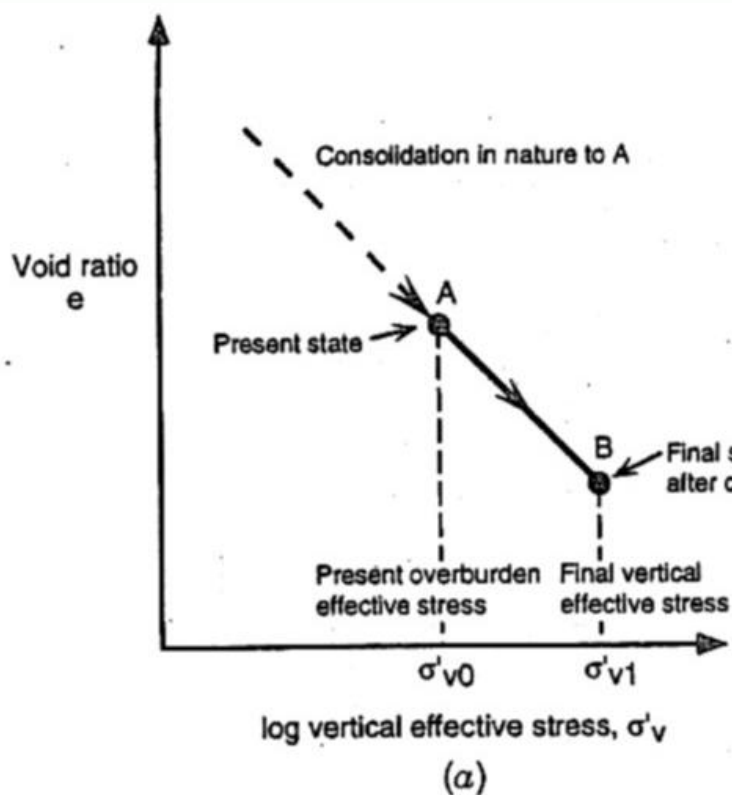
Indeks kompresije i rekompresije u ovisnosti o indeksu plastičnosti I_p (prema Kulhawy and Mayne 1990)

PRIMARNA KOMPRESIJA GLINE



Linije primarne kompresije za različite vrste tla (prema Lambe i Whitman 1969)

PREKONSOLIDACIJA GLINE



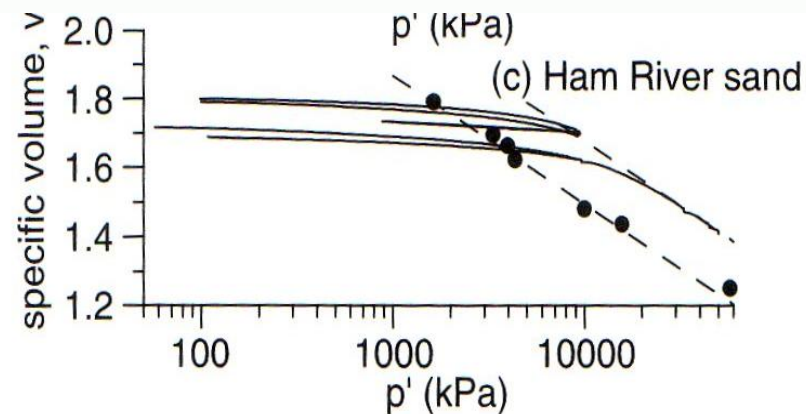
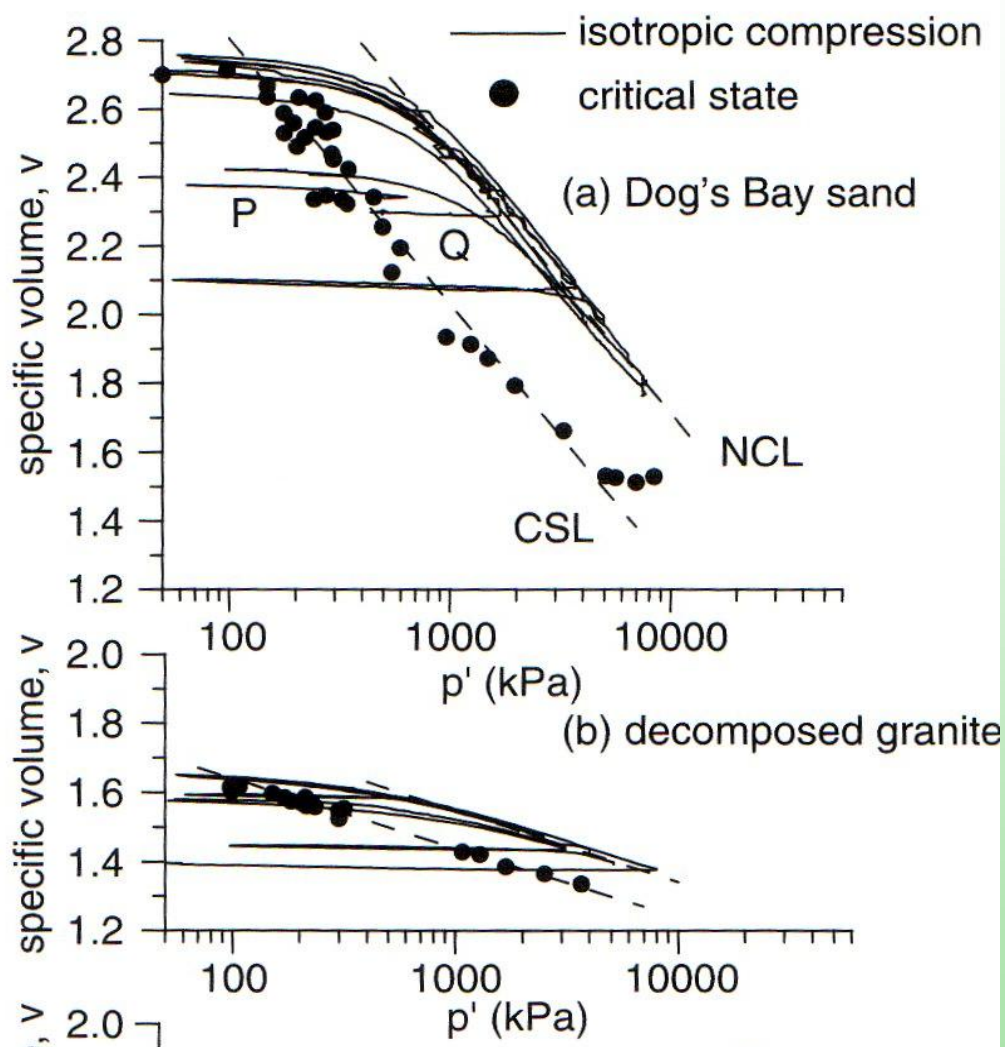
Idealizirana krivulja kompresije za gline.

a) normalno konsolidirane gline; b) prekonsolidirane gline.

σ'_{v0} – vertikalno naprežanje u tlu
 σ'_p – pritisak prekonsolidacije
 σ'_{v1} – pritisak nakon konsolidacije

OCR = σ'_p / σ'_{v0} koeficijent prekonsolidacije
 OCR = 1 normalno konsolidirano tlo
 OCR > 1 prekonsolidirano tlo

PREKONSOLIDACIJA PIJESKA

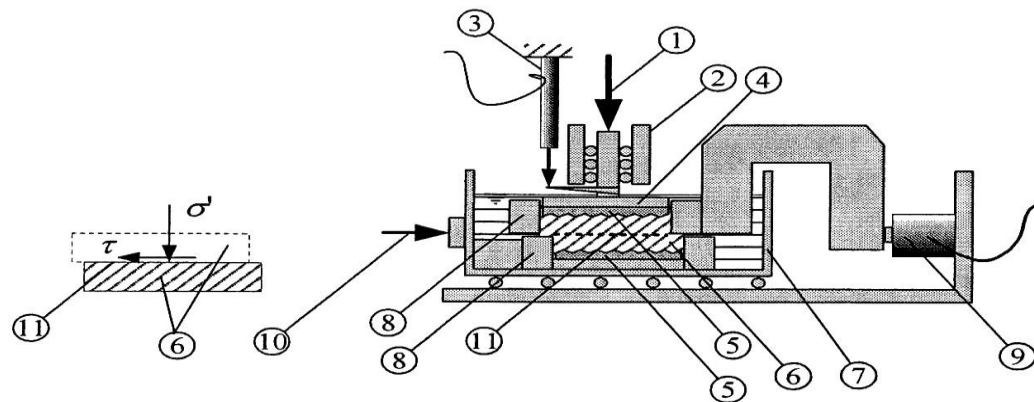


Primjeri izotropne kompresije pijeska.

- a) Dog's Bay pijesak
- b) Rastrošeni granit
- c) Ham River pijesak

Zbijeni pijesci imaju prividni pritisak prekonsolidacije σ'_p , međutim njegov iznos je vrlo velik i često nedostupan za mjerenje standardnom laboratorijskom opremom.

ČVRSTOĆA GLINE – uređaj za direktni posmik



ZADAJE SE:

- vertikalno opterećenje P

$$\sigma_1 = P/A$$

- horizontalna sila F

$$\tau = F/A$$

MJERI SE:

- pomak kalupa s_2

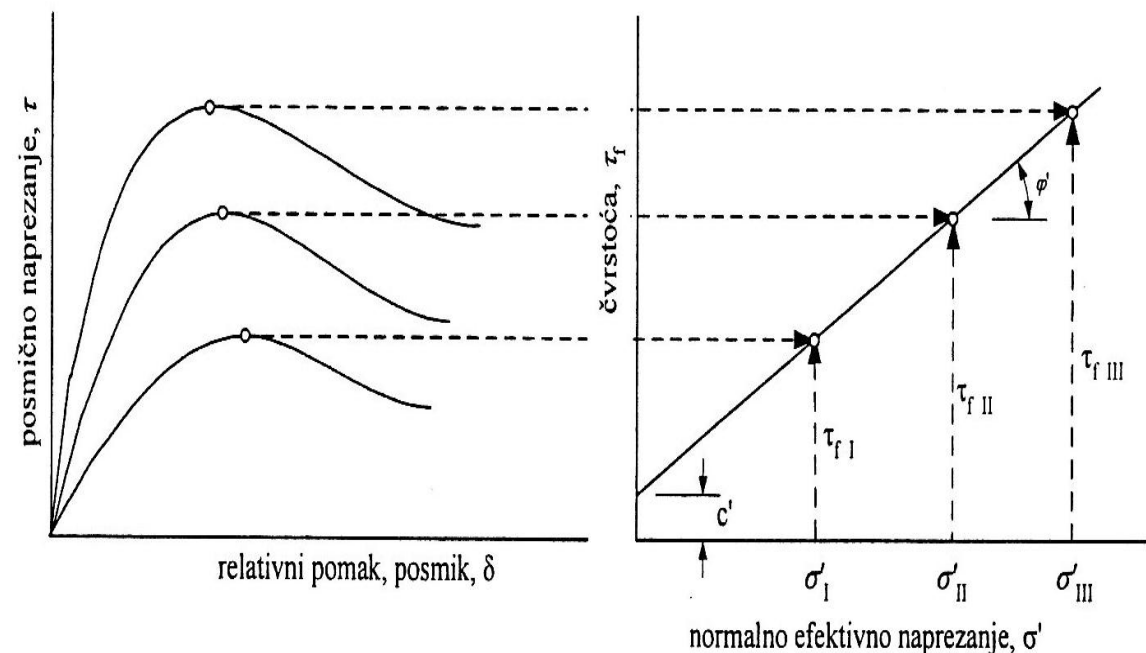
REZULTAT:

- parametri čvrstoće
- kohezija c [kN/m^2]
- kut unutarnjeg trenja φ [$^\circ$]

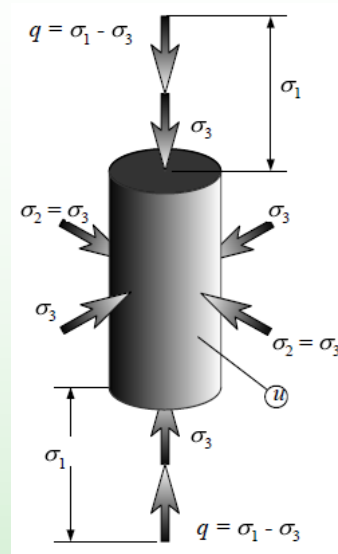
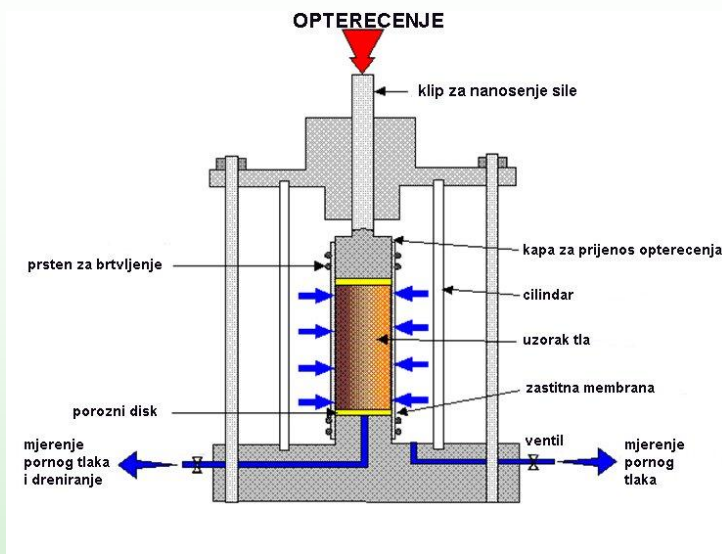
- MC zakon čvrstoće

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi$$

ČVRSTOĆA NA SMICANJE !



NEDRENIRANI TROOSNI POKUS - CIU



DIMENZIJE UZORKA:

H_0 – početna visina uzorka

D_0 – početni promjer uzorka

ZADAJE SE:

σ_1 – vertikalno naprezanje

$\sigma_3 = \sigma_3$ – radijalno naprezanje

MJERI SE:

ΔH – vertikalni pomak kape

u – porni pritisak - CIU

ΔV – promjena volumena (volumen vode koji izađe kroz dren) – CID

ΔD – promjena promjera uzorka

RAČUNA SE:

ε_1 – vertikalna relativna deformacija

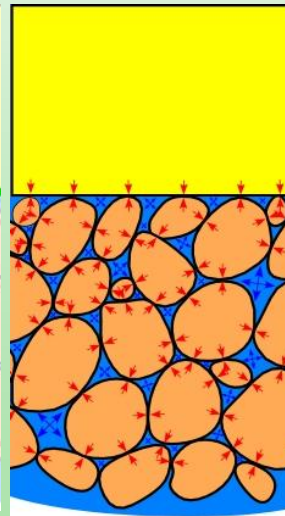
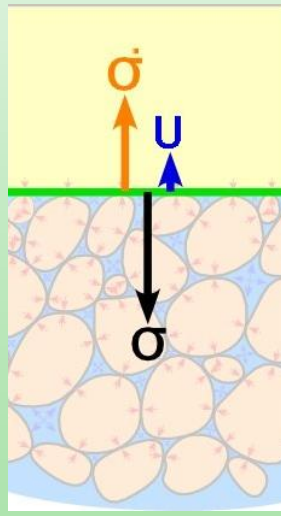
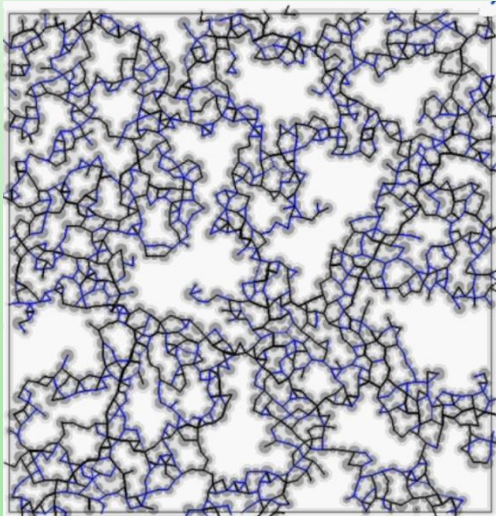
$\sigma_3 = \sigma_3$ – radijalna relativna def.

ε_v – volumenska deformacija

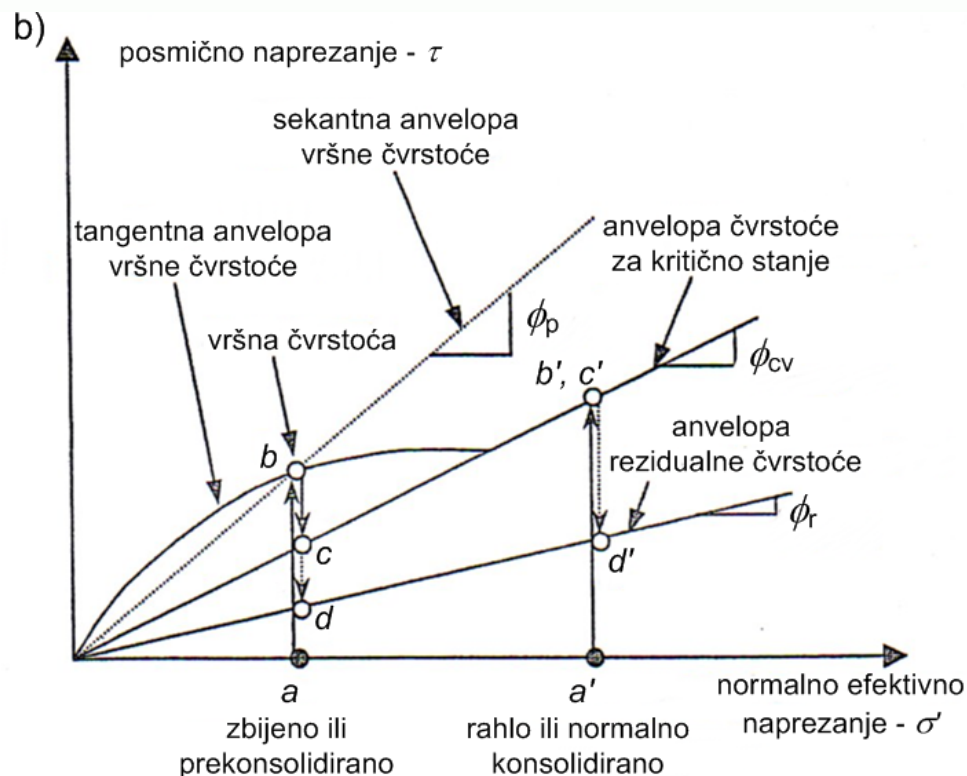
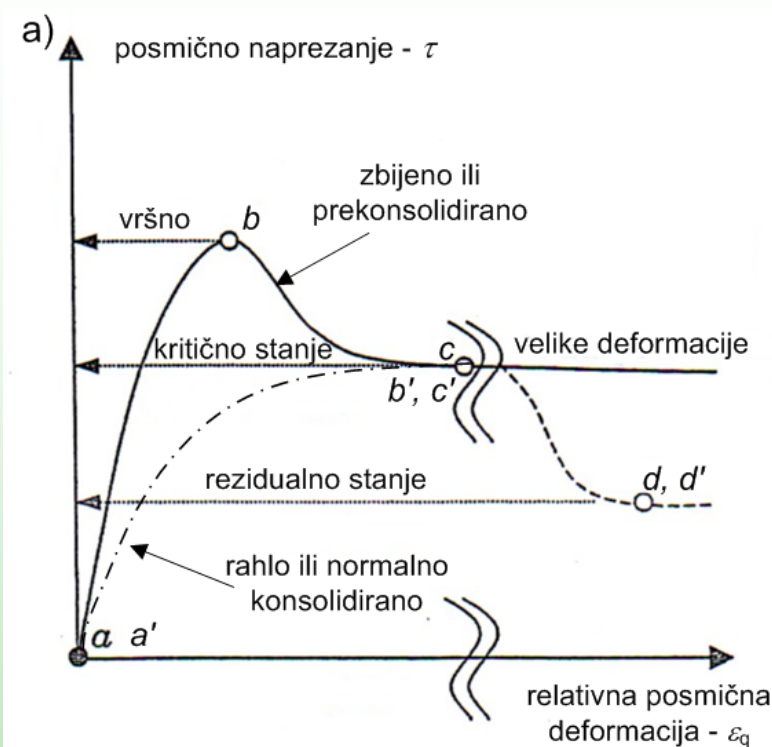
ε_q – devijatorska deformacija

p – srednje naprezanje

p' – efektivno srednje naprezanje

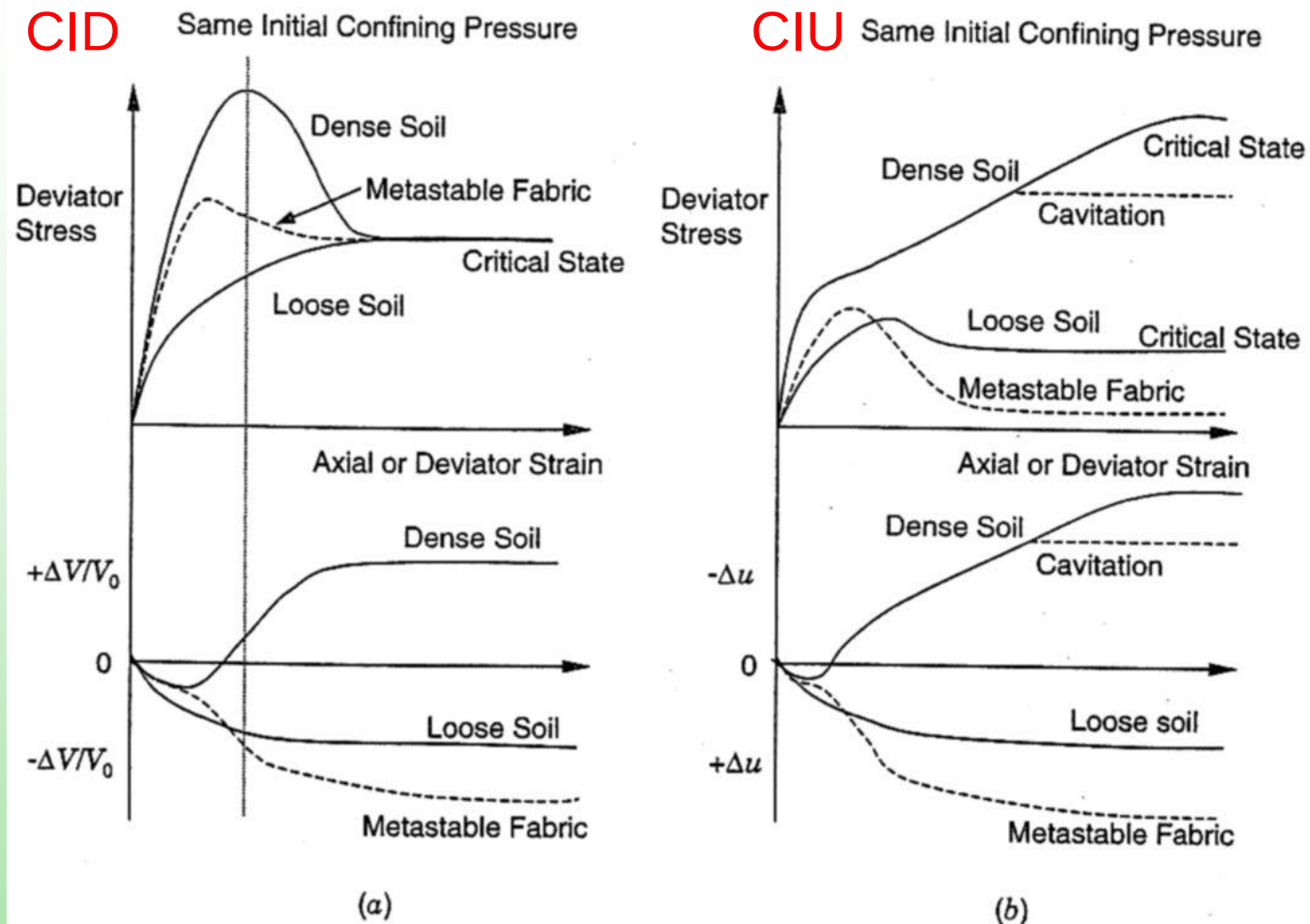


DEFORMACIJSKA KRIVULJA I ČVRSTOĆA



Na slici je shematski prikazana naponsko-deformacijska krivulja smicanja tla te linije čvrstoće u dijagramu $\tau - \sigma'$. Dosizanje vršne čvrstoće uslijed smicanja, nakon koje slijedi pad posmičnog napona prema čvrstoći za kritično stanje, karakteristično je za zbijene pijeske i prekonsolidirane gline. Rahli pijesci i normalno konsolidirane gline dolaze u kritično stanje uz stalan porast otpora. Za gline je karakteristično, da nakon velikih deformacija uslijed smicanja dolazi do usmjeravanja čestica gline duž plohe sloma i daljnjeg pada čvrstoće – rezidualna čvrstoća.

SMICANJE PIJESKA U TROOSNOM POKUSU

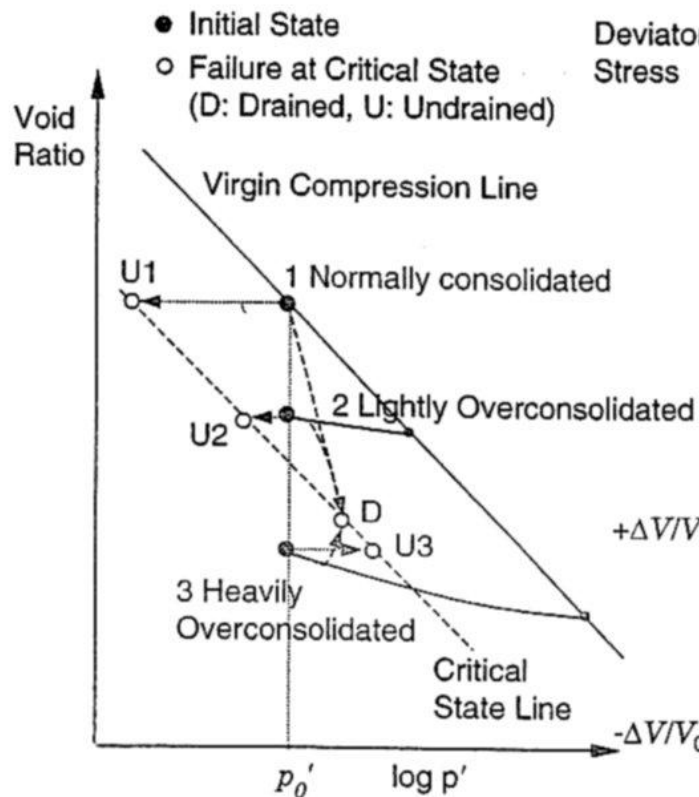


Naponsko-deformacijske krivulje smicanja **pijesaka različite zbijenosti** u dreniranom i nedreniranom troosnom pokusu te promjena volumena (CID) odnosno porih pritiska (CIU).

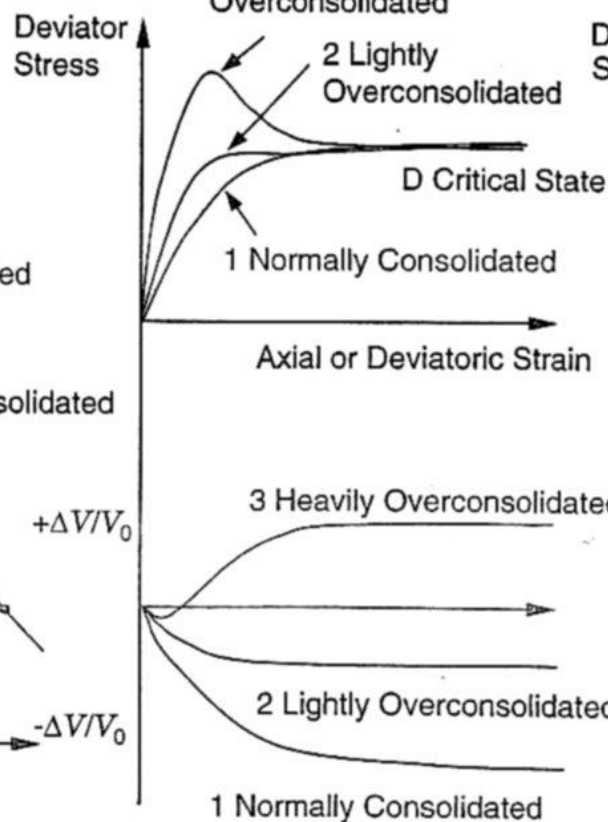
SMICANJE GLINE U TROOSNOM POKUSU

CID

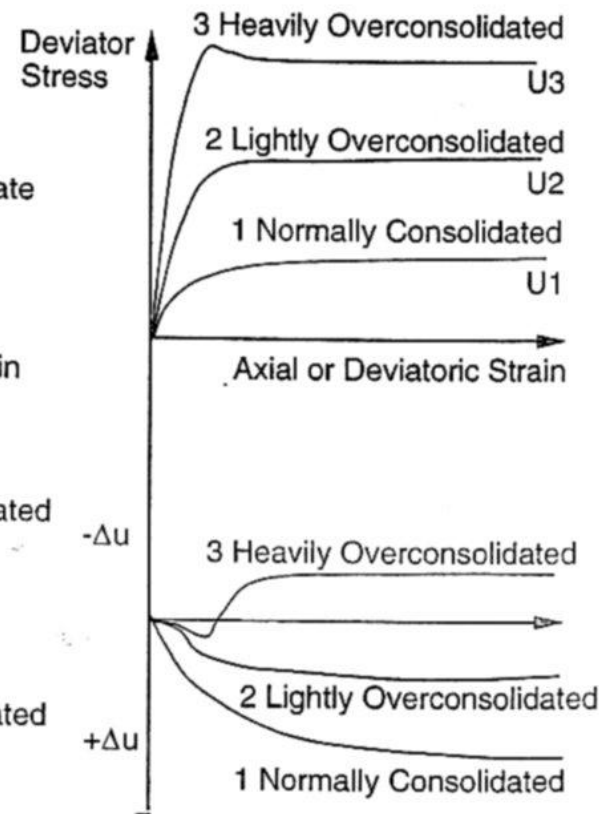
CIU



(a)



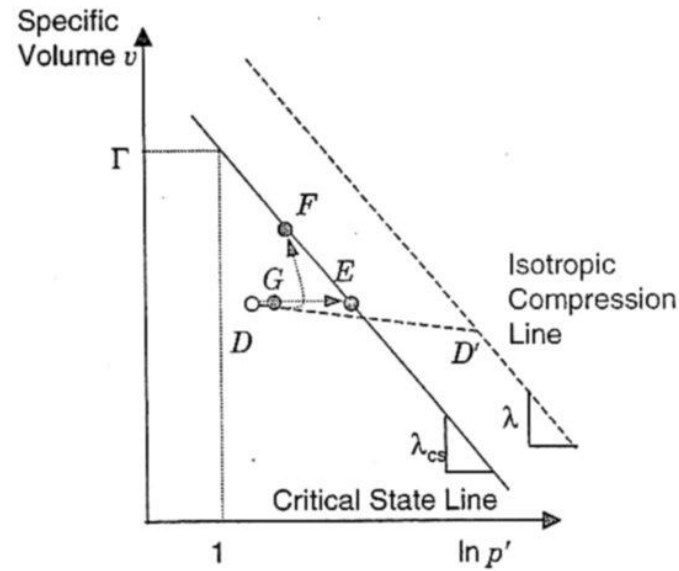
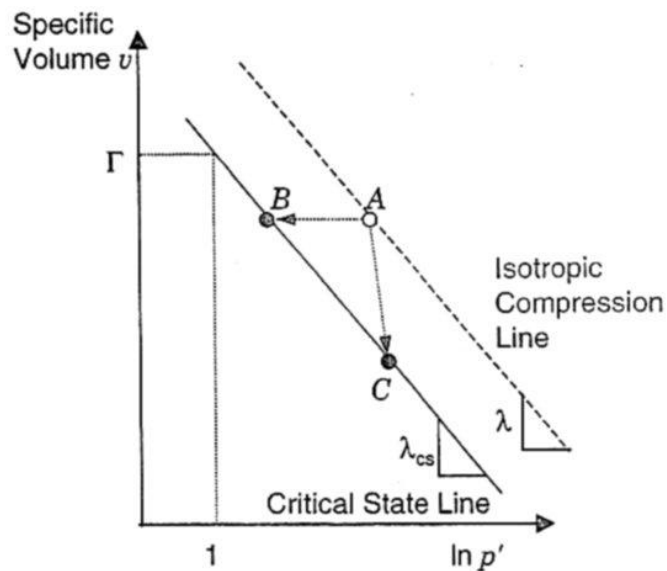
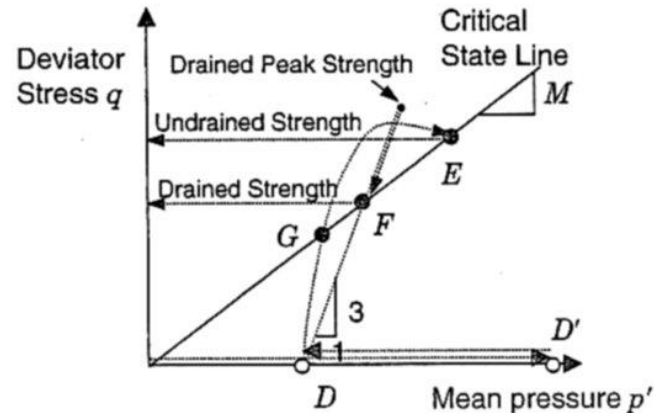
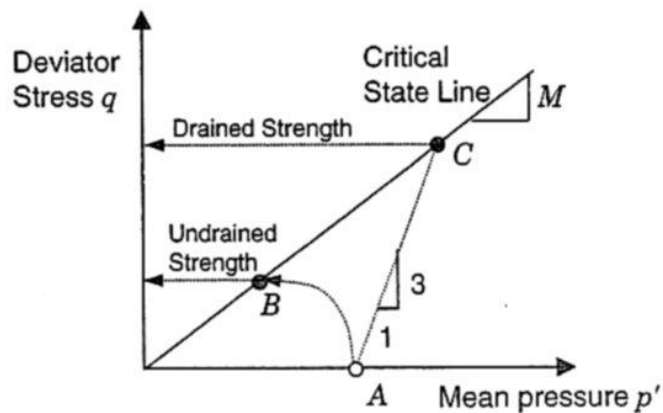
(b)



(c)

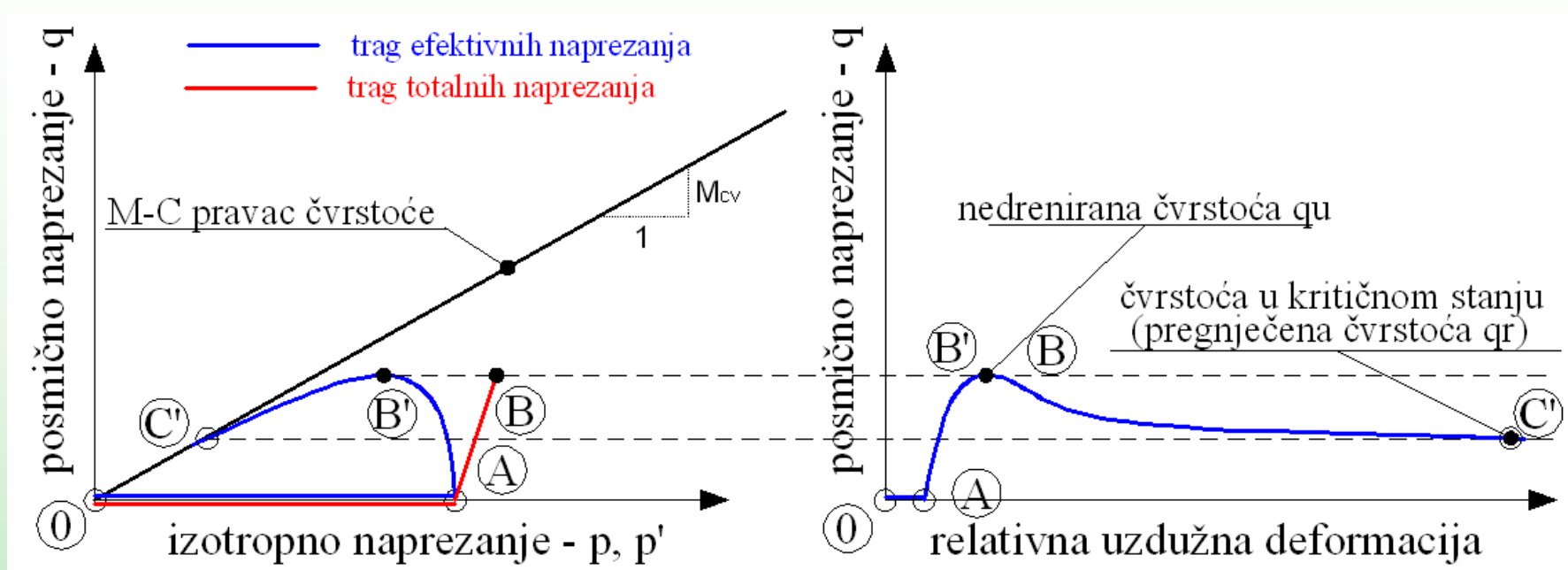
Naponsko-deformacijske krivulje smicanja **gljne različite prekonsolidiranosti** u dreniranom i nedreniranom troosnom pokusu te promjena volumena (CID) odnosno porih pritisaka (CIU).

SMICANJE GLINE U TROOSNOM POKUSU



Usporedba dreniranog i nedreniranog pokusa za normalno konsolidirane i prekonsolidirane gline

NEDRENIRANA ČVRSTOĆA – meke gline



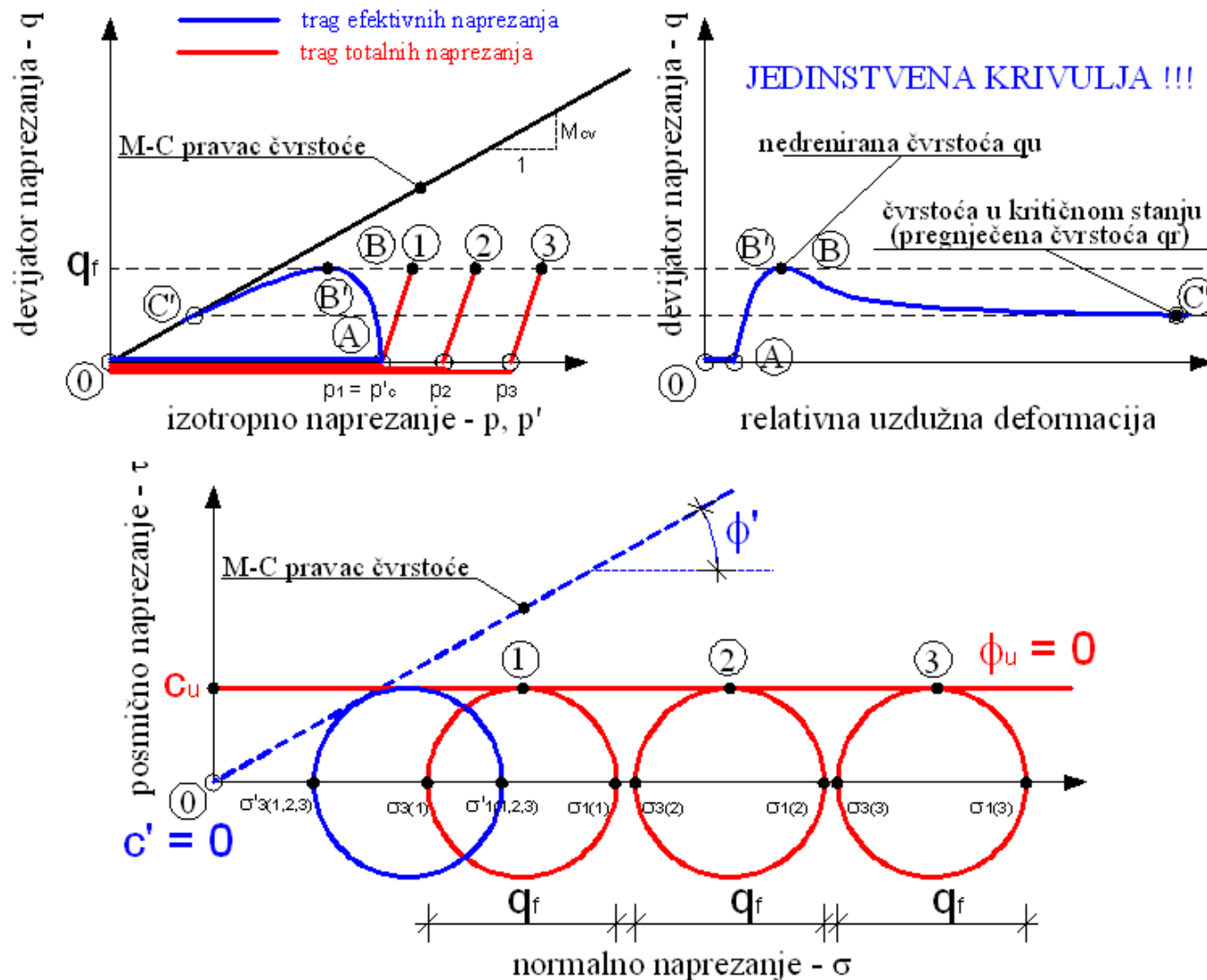
q_u – vršna čvrstoća: maksimalno devijatorsko naprezanje koje se ostvari uslijed smicanja rahlog uzorka pijeska u nedreniranim uvjetima, za početno stanje naprezanje nakon izotropne konsolidacije

q_r – pregnječena čvrstoća

$c_u = q_u / 2$ – nedrenirana čvrstoća: za uzorak koji se smiče iz početnog stanja (p'_0, e_0)

$S_t = q_u / q_r$ – osjetljivost gline (sensitivity)

NEDRENIRANA ČVRSTOĆA – $\varphi = 0$ analiza



NEDRENIRANA ČVRSTOĆA

NEDRENIRANA ČVRSTOĆA:

- tri uzorka iste gline konsolidiraju se na isti početni pritisak prekonsolidacije p'_c
- uzorak 1 smiče se u nedreniranim uvjetima nakon primarne konsolidacije dok se uzorci 2 i 3 prije smicanja dodatno izotropno optereće do izotropnog pritiska p_2 i p_3 , ali u nedreniranim uvjetima (tokom izotropnog opterećenja dren je zatvoren), nakon čega slijedi smicanje
- uzorci 1, 2, i 3 prolaze iste tragove deformacija
- zbog iste početne zbijenosti, istog pritiska prekonsolidacije i istih tragova naprezanja, sva tri uzorka prolaze istim tragom efektivnih naprezanja! S obzirom da je riječ o istom materijalu, svi uzorci imaju istu čvrstoću u efektivnim naprežanjima zbog čega postižu istu nedreniranu čvrstoću c_u

' $\varphi = 0$ ' ANALIZA:

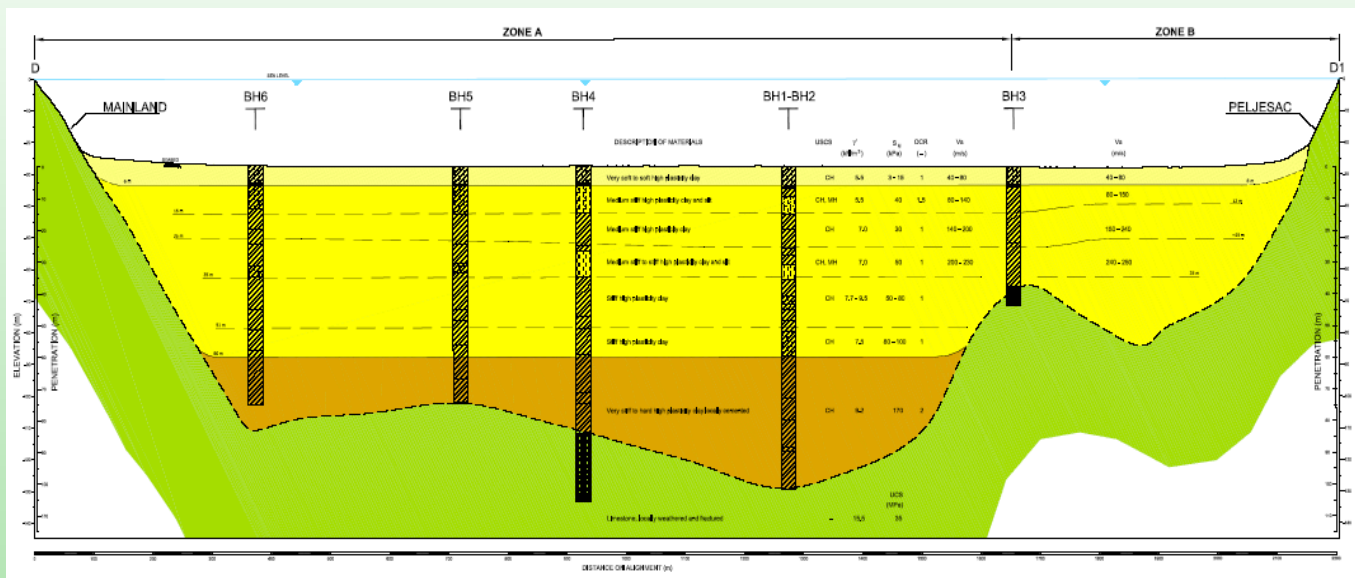
- primjenjuje se u analizama kod kojih se opterećenje nanosi brzo u odnosu na vodopropusnost tla, odnosno deformacije se odvijaju u nedreniranim uvjetima
- za razliku od dreniranih analiza, čvrstoća ovisi o stanju naprezanja prije nanošenja opterećenja. Provjera stabilnosti može se provesti za ukupna naprežanja uz čvrstoću $c = c_u$ i $\varphi = \varphi_u = 0$. Takva analiza naziva se $\varphi = 0$ analiza.

OSJETLJIVOST GLINA – brze gline (quick clay)



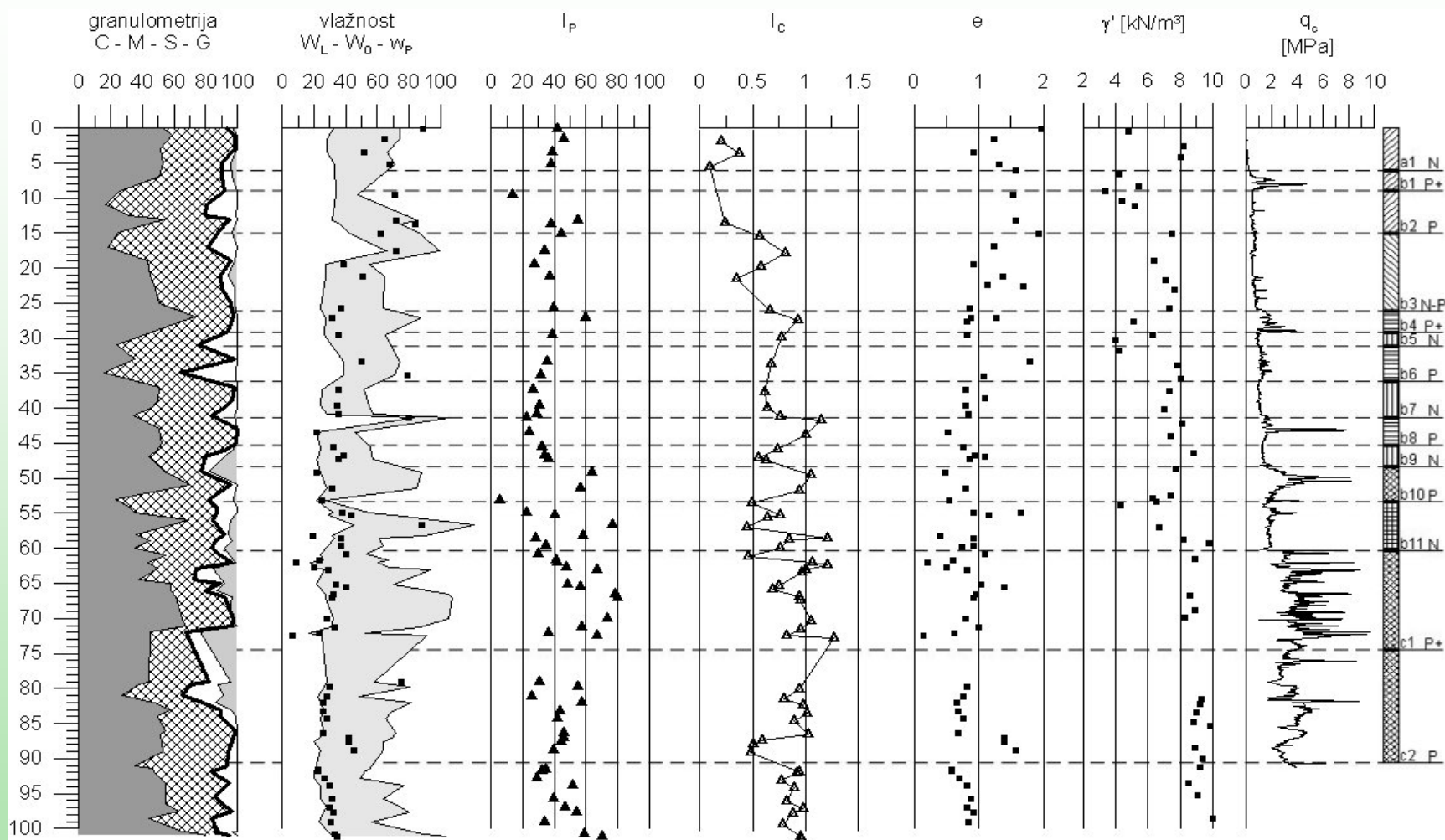
[The Quick Clay Landslide at Rissa - 1978 \(English commentary\).mp4](#)

ZALJEV PELJEŠAC – lokacija i profil tla



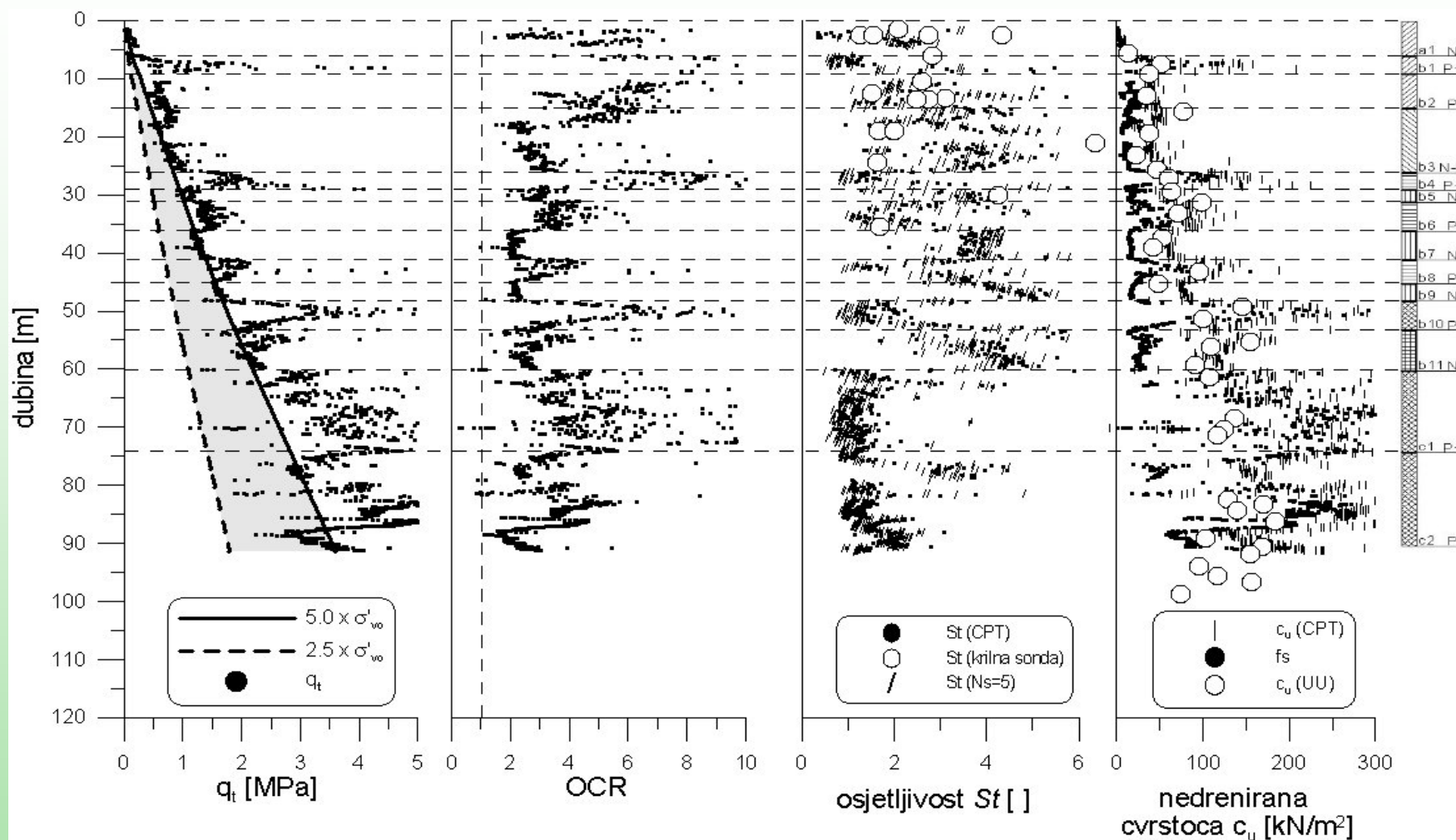
Geotehnički profil tla na lokaciji zaljeva Pelješac ispitan je za potrebe izgradnje mosta Pelješac. Tlo se sastoji od normalno konsolidiranih glina do dubine od 60 m ispod morskog dna te od prekonsolidiranih glina do pojave stijene na dubini od 100 m.

ZALJEV PELJEŠAC –profil tla



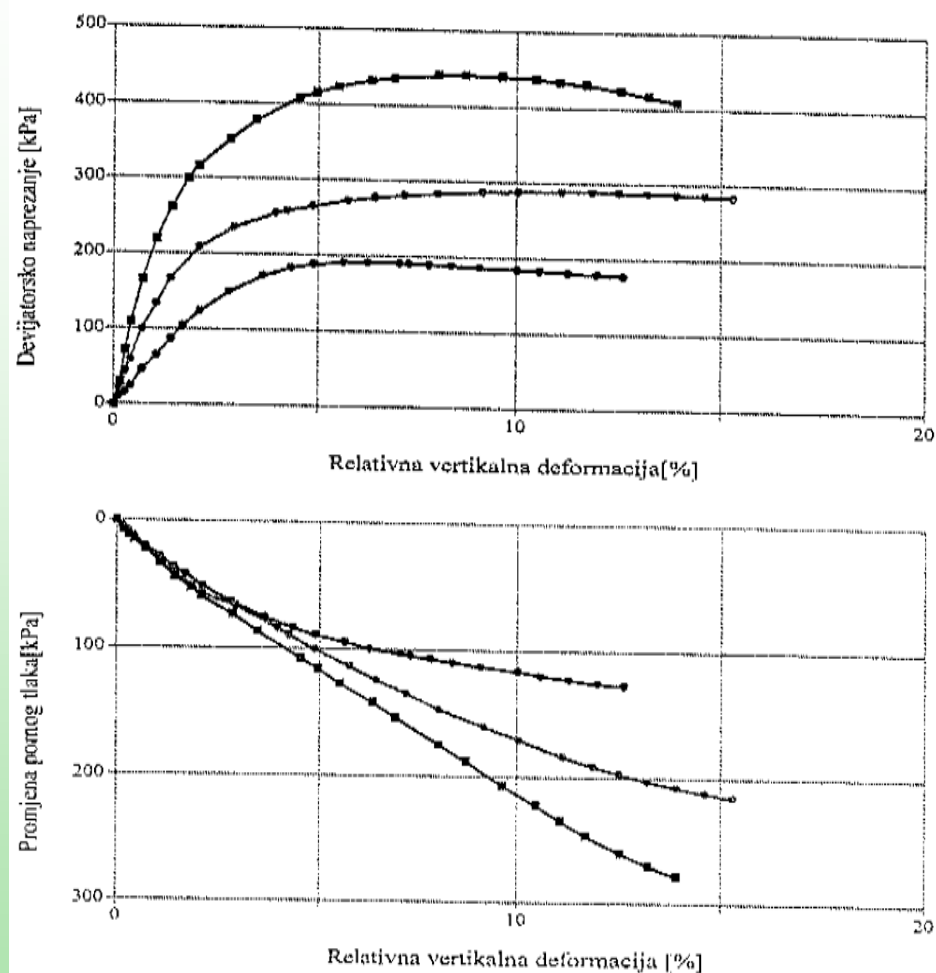
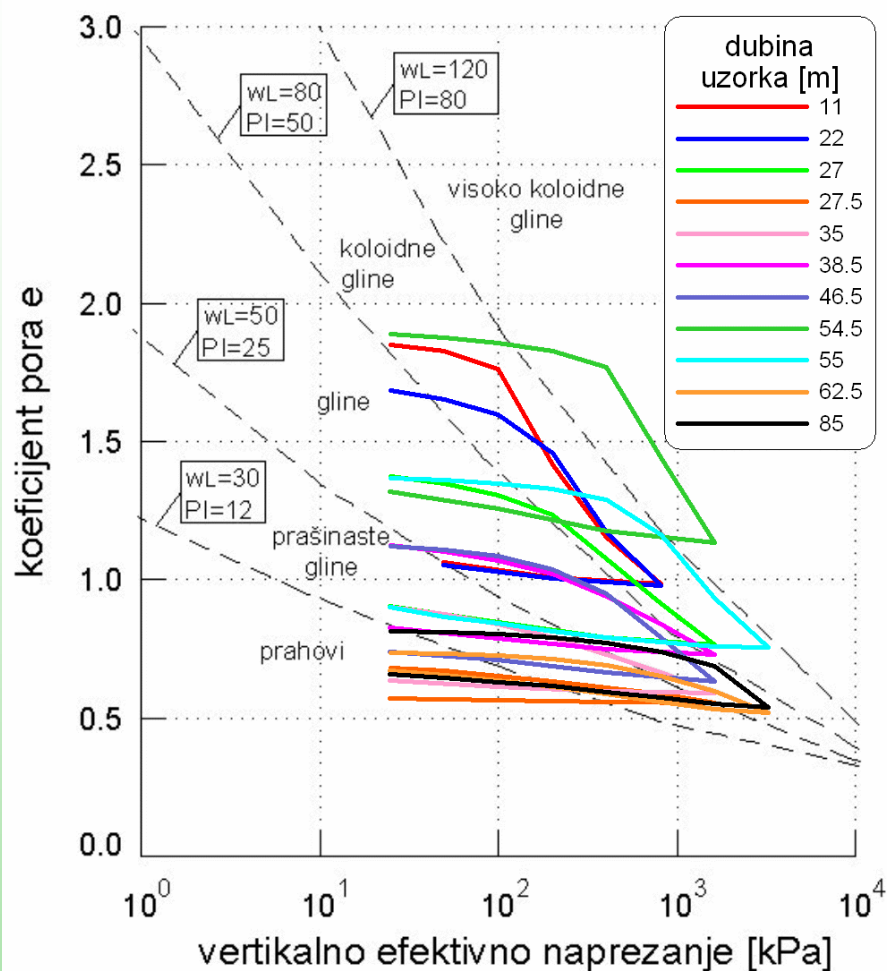
Geotehnički profil tla na lokaciji mosta Pelješac: a) granulometrijski sastav; b) vlažnost; c) indeks plastičnosti; d) koeficijent pora; e) efektivna jedinična težina; f) otpor šiljka CPT ispitivanja

ZALJEV PELJEŠAC – mehaničke karakteristike tla



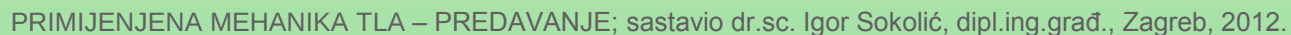
Fizičke i mehaničke karakteristike tla na lokaciji mosta Peljašac: a) korigirani otpor šiljka CPT ispitivanja; b) koefficient prekonsolidacije; c) osjetljivost; d) nedrenirana čvrstoća

ZALJEV PELJEŠAC – laboratorijska ispitivanja

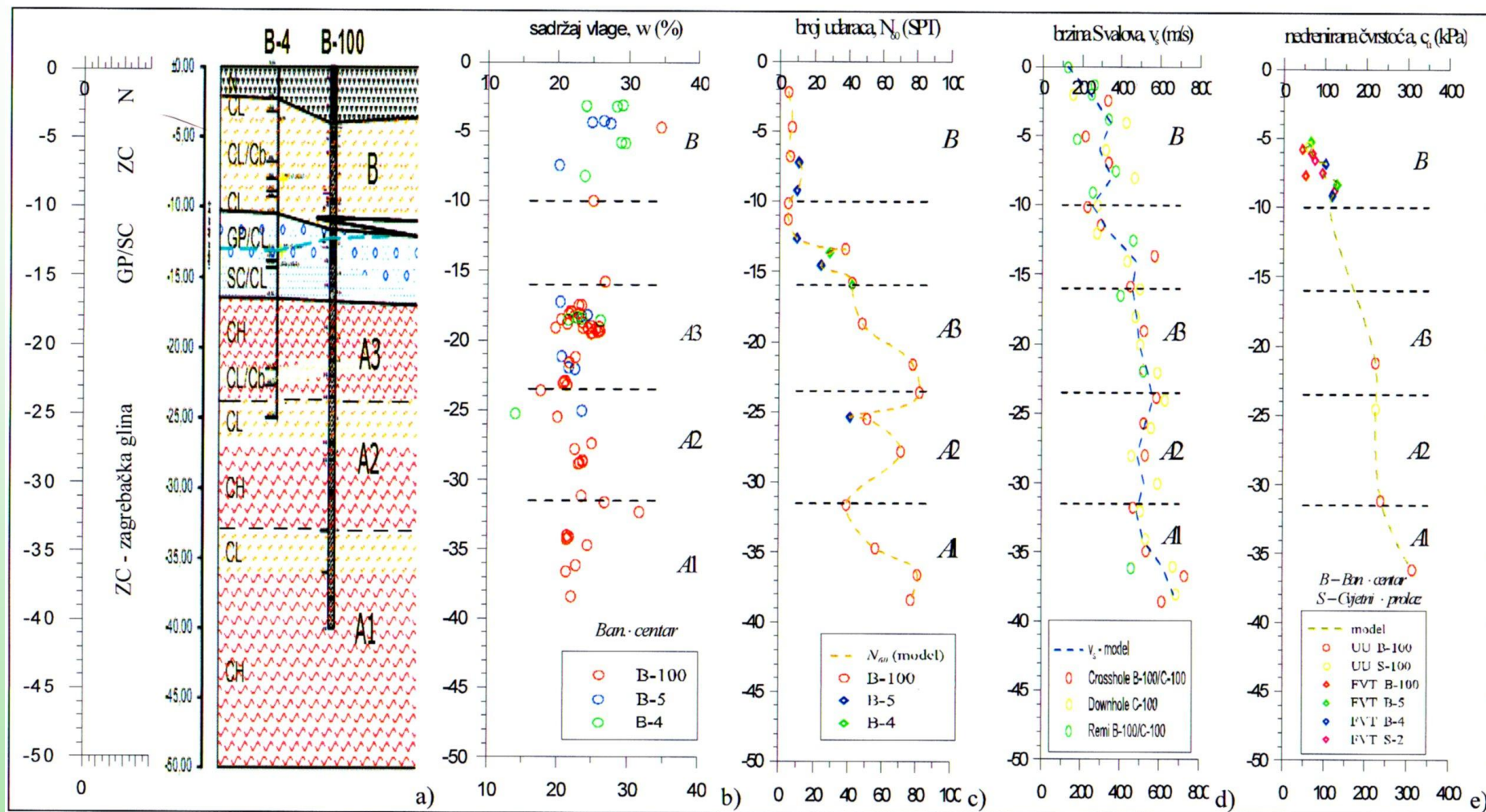


Laboratorijsko ispitivanje tla na lokaciji mosta Pelješac: a) edometarska ispitivanja; b) troosna ispitivanja u CIU pokusu (naponsko-deformacijska krivulja i promjena pornih pritisaka)

Geotehnički profil tla na lokaciji Ban Centar (profil tla za grad Zagreb karakterističan za aluvij rijeke Save)



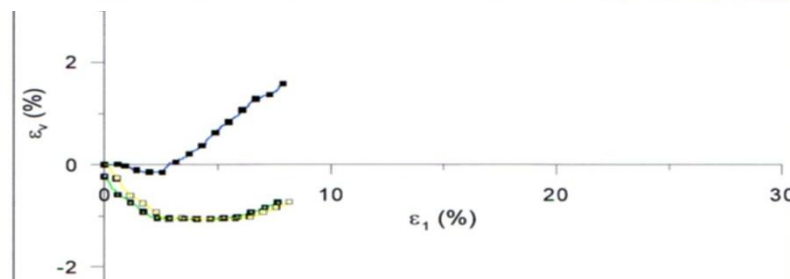
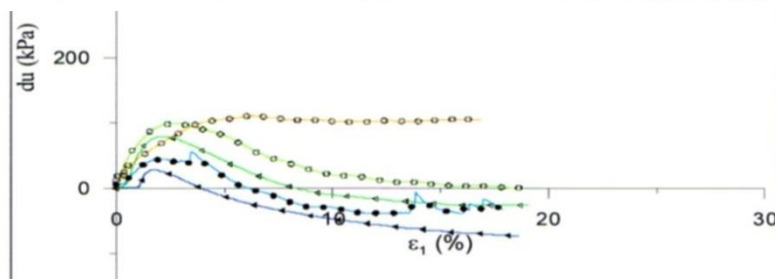
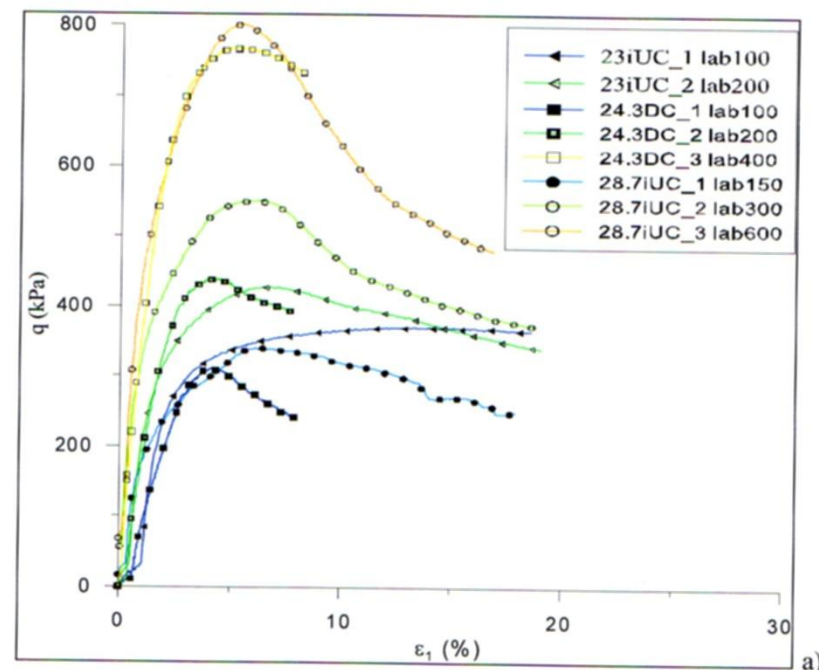
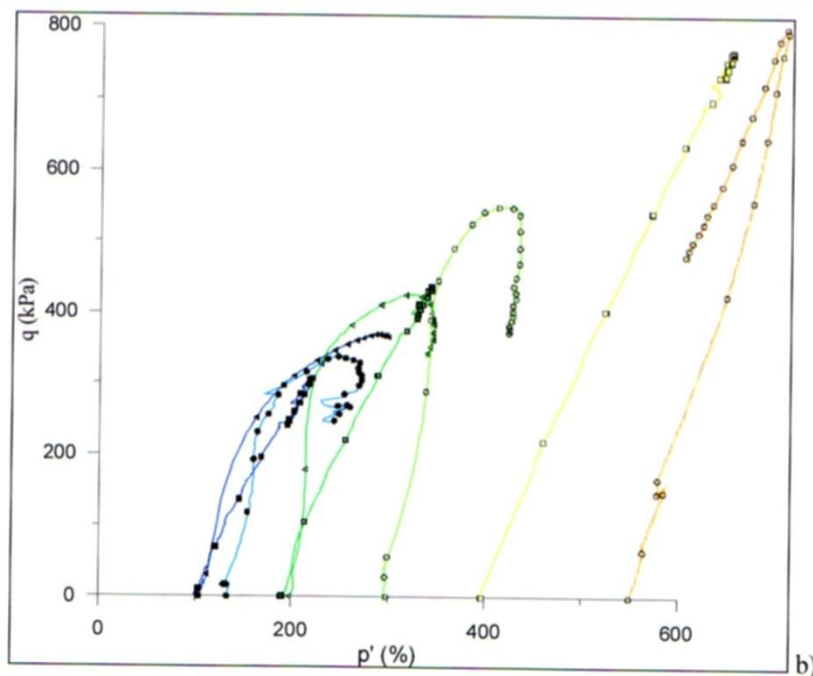
ZAGREB – profil tla na lokaciji Ban Centar



Geotehnički profil tla na lokaciji Ban Centar za potrebe izgradnje podzemnih etaža (Milaković 2012):

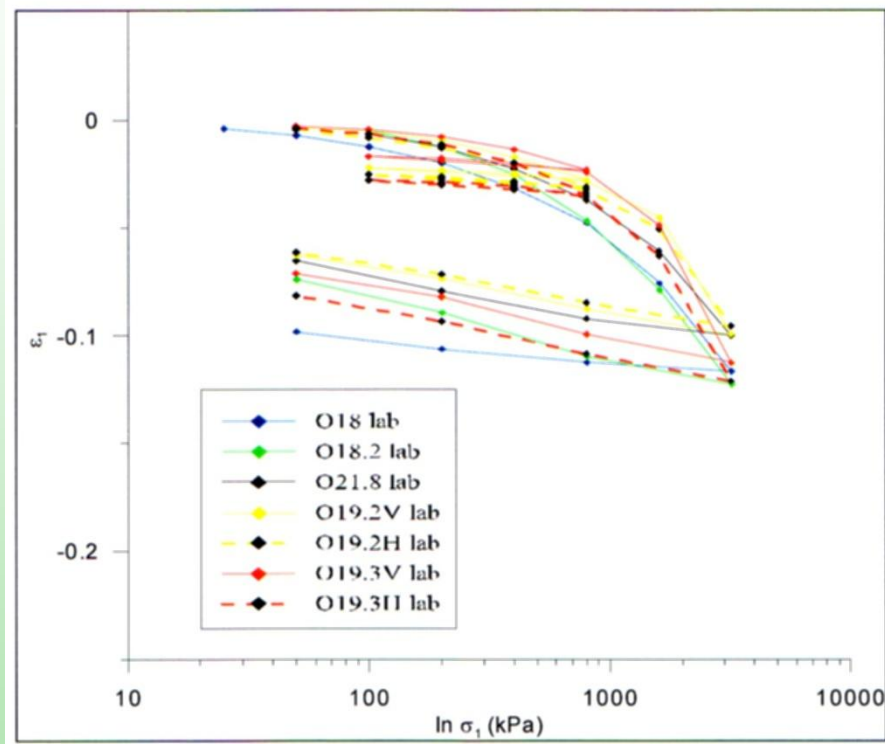
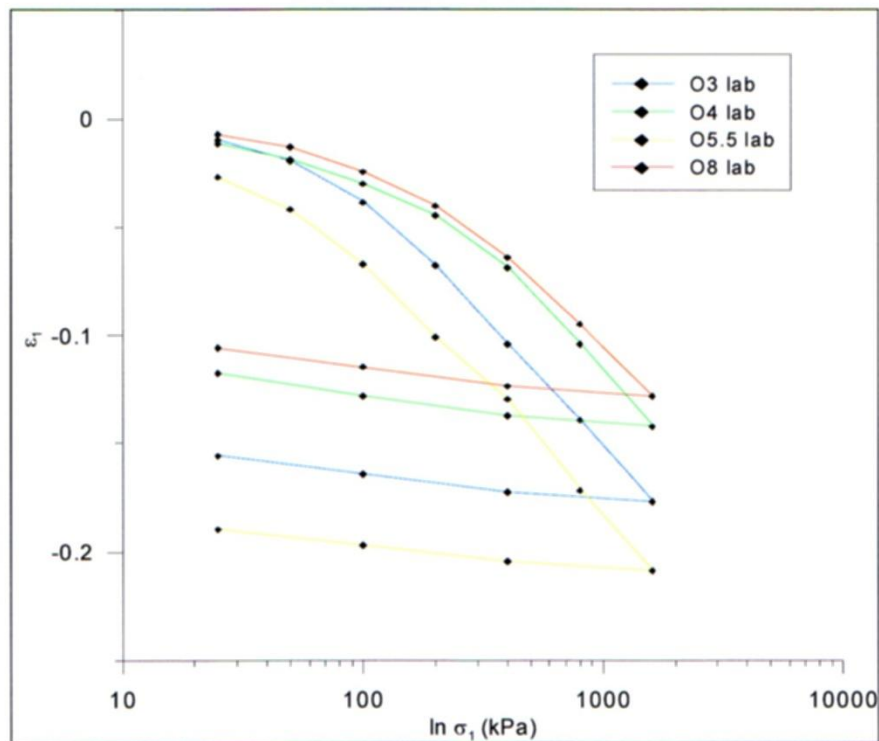
a) sadržaj vlage; b) profil SPT ispitivanja; c) brzina posmičnih valova; d) nedrenirana čvrstoća

ZAGREB – ispitivanje krute gline u troosnom pokusu



Ispitivanje krute zagrebačke gline u dreniranom i nedreniranom troosnom pokusu (Milaković 2012) ; a) trag efektivnih naprezanja; b) naponsko-deformacijska krivulja smicanja; d) promjena pornih pritisaka za CIU pokuse; e) promjena volumena za CID pokuse

ZAGREB – ispitivanje krute gline u edometru



Ispitivanje krute zagrebačke gline u edometru (Milaković 2012); a) uzorci iz sloja B geotehničkog profila; b) uzorci iz sloja A2 geotehničkog profila